

ระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของ  
เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณ  
แบบไมโครโพลมิเตอร์



นายภัทรพงษ์ สู้หนองบัว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2565

CONTROLLING AND INFRARED SPECTRAL ACQUISITION SYSTEM  
FOR DISPERSIVE SPECTROMETER EQUIPPED WITH  
MICROBOLOMETER DETECTOR



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2022

ระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์  
ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลมิเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



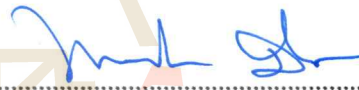
.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ)

ประธานกรรมการ



.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาศึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พนมศักดิ์ มีมนต์)

กรรมการ



.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภัทรพงษ์ สู้หนองบัว : ระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของ  
เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอ  
มิเตอร์ (CONTROLLING AND INFRARED SPECTRAL ACQUISITION SYSTEM FOR  
DISPERSIVE SPECTROMETER EQUIPPED WITH MICROBOLOMETER DETECTOR)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน, 96 หน้า.

คำสำคัญ: อินฟราเรดสเปกโทสโคปี/สเปกโทมิเตอร์/ไมโครโบลอมิเตอร์

ระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิด  
หลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา  
ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงในการเก็บสัญญาณค่า  
การสะท้อนพลังงานทางสเปกโทรสโกปีและเพื่อพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการตรวจวิเคราะห์และการ  
ประมวลผลสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรดรวมถึงการ  
สร้างโปรแกรมการควบคุมสำหรับผู้ใช้งานด้วยภาษา NI LabView โดยการออกแบบและสร้างเครื่อง  
สเปกโตรมิเตอร์สำหรับการตรวจวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นใช้หลักการ Czerny-  
Turner Spectrometer ร่วมกับการพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมการหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน 300  
ร่อง/มิลลิเมตร เพื่อกำหนดมุมแสงตกกระทบและมุมแสงเลี้ยวเบนให้ทำงานร่วมกับการประยุกต์ใช้  
เครื่องตรวจวัดสัญญาณความร้อนแบบไมโครโบลอมิเตอร์ชนิดอาเรย์สำหรับงานทางสเปกโทสโคปี ซึ่ง  
การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมของระบบควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่าน  
อินฟราเรดที่พัฒนาขึ้นใช้แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ Optical Parametric Oscillator และการ  
เปรียบเทียบค่าสเปกตรัมอินฟราเรดค่ามาตรฐานสำหรับฟิล์มพอลิไธรีน โดยสเปกตรัมประจำความ  
ยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงคลื่นอินฟราเรด 2000 ถึง 6000 นาโนเมตร และมีค่าการแยกขีดเชิง  
สเปกตรัมสูงสุด 12 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 3700 นาโนเมตร นอกจากนี้การตรวจสอบข้อดีการ  
ประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์ชนิดอาเรย์สามารถตรวจวัดสัญญาณ  
สเปกตรัมประจำตำแหน่งเชิงเส้นโดยมีค่าการแยกขีดเชิงตำแหน่ง 3.5 แถบต่อมิลลิเมตร หรือ 140  
ไมโครเมตร และข้อจำกัดเฉพาะด้านสัญญาณรบกวนจากความร้อนเนื่องจากเป็นตัวตรวจวัดชนิดไม่มี  
ระบบระบายความร้อนไนโตรเจนเหลวโดยค่าอัตราส่วนของสัญญาณและสัญญาณรบกวน 32 ที่  
อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ภัทรพงษ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....[ลายมือ]



PATTARAPONG SUNONGBUA : CONTROLLING AND INFRARED SPECTRAL ACQUISITION SYSTEM FOR DISPERSIVE SPECTROMETER EQUIPPED WITH MICROBOLOMETER DETECTOR. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. WEERASAK LERTSIRIYOTHIN, Ph.D., 96 PP.

Keyword: Infrared spectroscopy/Spectrometer/Microbolometer

The infrared spectral control and acquisition system for the dispersive spectrometer equipped with a microbolometer detector was aimed to develop the controlling system for infrared spectral acquisition of the dispersive spectrometer and to develop the algorithms for analyzing and processing infrared spectral signal utilizing a user-interface control program written in the LabView programming. The design and construction of a spectrometer for spectral wavelength analysis based on the Czerny-Turner principle were employed in the development of the 300 grooves/mm diffraction grating rotation control algorithm to determine the incidence and the diffraction angles by utilizing the focal plane array microbolometer with the spectroscopic application. The developed infrared spectral control of the system was validated using an Optical Parametric Oscillator pulsed laser light source and a comparison to the standard infrared spectral value for polystyrene film. The infrared spectral wavelength ranges from 2000 to 6000 nm with a maximum spectral resolution of 12 nm at 3700 nm. Linear spatial resolution with 3.5 line-pairs/mm or 140  $\mu\text{m}$  and thermal noise limitation as a non-cooled liquid nitrogen detector with a signal-to-noise ratio of 32 at 20 °C.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงเนื่องด้วยการช่วยเหลือการดำเนินงานวิจัยอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเภททุนกิตติบัณฑิต และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือ สถานที่ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ และคำแนะนำแนวทางการศึกษาตลอดจนผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ประสบความสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ รองศาสตราจารย์ ดร.พนมศักดิ์ มีมนต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจรค คณะกรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ที่  
กรุณาถ่ายทอดความรู้และคำแนะนำตลอดระยะเวลาในการศึกษา

ขอขอบพระคุณคณะวิจัย อาจารย์จรูญศักดิ์ สมพงษ์ ดร.นัฐพิชฌ บุตรี ดร.สุวรรณ เอกรัมย์ และคุณจินตพร กลิ่นสุข ในหน่วยวิจัยนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์และอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอบพระคุณเพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร รวมถึงบุคคลที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดระยะเวลาการศึกษา

สำหรับประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นผลจากการช่วยเหลือของทุกท่านที่กล่าวมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ภัทรพงษ์ สู้หนองบัว

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>2</b>
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves).....	2
2.2 สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy).....	7
2.3 สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer).....	14
2.4 ปรีทศน์วรรณกรรม.....	21
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>26</b>
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	28
3.2.1.	ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง.....	28
3.2.2	การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView.....	31
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณ .....	34
3.3.1	การทดสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นด้วยแหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO.....	34
3.3.3	การทดสอบการแยกขีดเชิงตำแหน่ง (Spatial resolution) ของระบบ.....	36
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	38
4.1	ผลการออกแบบเส้นทางการลำแสงสำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์ .....	28
4.2	ผลการสร้างระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	40
4.3	การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView .....	42
4.4	ผลของประสิทธิภาพเชิงแสงของระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์.....	49
4.4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง OPO .....	49
4.4.2	การตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดโดยใช้มาตรฐานพอลิสไตรีน (Polystyrene).....	53

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดด้านเทคนิคของการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโวลมิเตอร์สำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบน .....	54
4.5 ตัวแปรที่สำคัญของระบบสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโวลมิเตอร์ .....	58
<b>5 สรุปผลการวิจัย .....</b>	<b>28</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง .....	61
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการสร้างอัลกอริทึมของระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดด้วยภาษา NI LabView.....	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการสร้างอัลกอริทึมของระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดด้วยภาษา Python.....	71
ภาคผนวก ค ส่วนประกอบและอุปกรณ์ทางแสงสำหรับระบบเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง .....	74
ภาคผนวก ง บทความและงานประชุมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	76
ภาคผนวก จ หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ .....	94
ประวัติผู้เขียน .....	96



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงคลื่นแสงย่านอินฟราเรด .....	10
2.2 ตารางแสดงการคำนวณค่าความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่คลื่นอันดับ 1 <sup>ST</sup> , 2 <sup>ND</sup> และ 3 <sup>RD</sup> -ORDER DIFFRACTION .....	18
3.1 ตารางแสดงค่าค่าความถี่เชิงตำแหน่ง (SPATIAL FREQUENCY) ของ GROUP และ ELEMENT สำหรับ แผ่นมาตรฐาน 1951 USAF RESOLUTION TARGET .....	36
4.1 ตัวอย่างค่าตัวแปรที่ได้จากอัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาว คลื่น .....	47
4.2 ตารางสรุปตัวแปรที่สำคัญของระบบสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจ วัดสัญญาณแบบไมโครโพลีเมเตอร์ .....	58
ค.1 รายการส่วนประกอบและอุปกรณ์ทางแสงสำหรับระบบเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรด ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง .....	75

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC SPECTRUM) .....2
2.2	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC WAVES) .....6
2.3	ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....6
2.4	การเปลี่ยนแปลงสถานะของระดับพลังงานจากสถานะพื้น ( $E_0$ ) สู่อุณหภูมิ ( $E^*$ ) .....7
2.5	ความกว้างของเส้นสเปกตรัม(SPECTRAL LINEWIDTH OR SPECTRAL BANDWIDTH) ที่ FULL WIDTH AT HALF MAXIMUM (FWHM) ..... 10
2.6	รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล..... 11
2.7	โมเลกุลของ $H_2O$ ที่สถานะพื้น (GROUND STATE) และการสั่นแบบพื้นฐาน 3 รูปแบบที่สถานะถูกกระตุ้น (EXCITED STATES) ที่คลื่นอินฟราเรดเลขคลื่น $1711\text{ cm}^{-1}$ (IN PLANE SCISSORING), $3730\text{ cm}^{-1}$ (SYMMETRIC STRETCHING) และ $3850\text{ cm}^{-1}$ (ASYMMETRIC STRETCHING) ..... 12
2.8	การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่าน (TRANSMISSION) ..... 13
2.9	การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบ ATR (ATTENUATED TOTAL REFLECTION)..... 13
2.10	การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบสะท้อน (REFLECTION) (ก) REFLECTION-ABSORPTION (ข) SPECULAR REFLECTION และ (ค) DIFFUSE REFLECTION..... 14
2.11	แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องมือการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี ..... 15
2.12	ค่าพลังงานประจำความยาวคลื่นแหล่งกำเนิดแสง GLOBAL SLS203 ..... 16
2.13	CZERNY-TURNER SPECTROMETER..... 16
2.14	เกรตติงแบบส่องผ่าน (TRANSMISSION GRATING)..... 17
2.15	เกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน (REFLECTION GRATING)..... 18
2.16	การเปรียบเทียบการแยก (CONTRAST OR MODULATION) ของสัญญาณภาพ ..... 20
2.17	การเปรียบเทียบการแยกของภาพวัตถุและสัญญาณภาพการตรวจวัดด้วยระบบเชิงแสง ..... 20
2.18	ระบบสเปกโตรมิเตอร์ชนิดเกรตติงเลี้ยวเบนย่านแสงที่สามารถมองเห็นได้ ..... 21

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 การตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมด้วยการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบน.....	22
2.20 รูปสัญญาณภาพสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นน้อย (B) ความเข้มข้นกลาง (C) ความเข้มข้นสูงและ (D) สัญญาณสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	23
2.21 ตัวอย่างมาตรฐานการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัม (ก) TRANSMITTANCE WAVELENGTH STANDARD (ข) REFLECTANCE WAVELENGTH STANDARD (PIKE TECHNOLOGIES, INC.) และ (ค) %TRANSMITTANCE OF POLYSTYRENE REFERENCE MATERIALS (NIST STANDARD) .....	24
2.22 โครงสร้างระดับพิกเซลของไมโครโบลอมิเตอร์ .....	24
2.23 SPECTRAL RESPONSE OF THE INO MICROBOLOMETER.....	25
2.24 GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI) ในการสอบเทียบความถูกต้องของสเปกตรัม .....	26
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2 การออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยหลักการ CZERNY-TURNER SPECTROMETER.....	28
3.3 ออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ZEMAX OPTICAL STUDIO .....	29
3.4 การออกแบบส่วนของระบบแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยหลักการ CZERNY-TURNER SPECTROMETER ด้วยโปรแกรม ZEMAX OPTICAL STUDIO .....	30
3.5 (ก) เส้นทางเดินแสงและพิกัดขนาดของกระจก OAP (ข) ABSOLUTE EFFICIENCY ของเกรตติงเลี้ยวเบนย่านอินฟราเรด 300 GROOVES/MM.....	30
3.6 การสร้างอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโกปีของระบบ .....	31
3.7 สัญญาณพัลส์ที่ T=1 คาบเวลาที่ทำให้สเตปมอเตอร์หมุนไป 1 สเตป .....	33
3.8 การติดตั้ง MOTORIZED ROTATING STAGE และระบบควบคุมการหมุนด้วย MICRO STEP DRIVER... ..	34
3.9 การออกแบบระบบทดสอบความถูกต้องของความยาวคลื่นด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การออกแบบระบบทดสอบความถูกต้องของความยาวคลื่นด้วยมาตรฐานพอลิสไตรีน (POLYSTYRENE, PS) .....	36
3.11 1951 USAF RESOLUTION TARGET GROUP 1 ถึง 3 และ ELEMENT 1 ถึง 6 .....	37
4.1 ระบบการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio.....	28
4.2 การกำหนดมุมของการสะท้อนที่อันดับคลื่นที่ศูนย์ด้วยโปรแกรม ZEMAX OPTICAL STUDIO .....	39
4.3 การกำหนดมุมของการสะท้อนที่อันดับคลื่นที่ 1 ด้วยโปรแกรม ZEMAX OPTICAL STUDIO .....	40
4.4 การสร้างระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	40
4.5 ส่วนของเก็บสัญญาณการสะท้อนจากตัวอย่าง .....	41
4.6 ส่วนของการแยกความยาวคลื่น .....	41
4.7 อัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LABVIEW .....	42
4.8 GRAPHIC USER INTERFACE สำหรับระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด .....	43
4.9 อัลกอริทึมสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งมุมอ้างอิงของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ .....	44
4.10 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น .....	46
4.11 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดไมโครโวลมิเตอร์ประจำตำแหน่งมุมหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน.....	48
4.12 อัลกอริทึมสำหรับเตรียมตรวจวัดสัญญาณ .....	48
4.13 (ก) การติดตั้งระบบสำหรับลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสง OPO โดยใช้สายเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติก (ข) ตำแหน่งการติดตั้งสายเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติกเข้ากับระบบการเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรด.....	49
4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำช่วงความยาวคลื่น 3 ถึง 6 ไมโครเมตร ด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO .....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO.....	51
4.16 ความสัมพันธ์ของความกว้างของช่องเปิดแสงเข้าและการแยกขีดของสเปกตรัม (SPECTRAL RESOLUTION).....	52
4.17 สเปกตรัมการส่องผ่านของมาตรฐานพอลิสไตลีน NIST SRM 1921B ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROMETER และเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการ เลี้ยวเบนแสง.....	53
4.18 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (BACKGROUND NOISE) ของตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์สำหรับช่วง อนุกรม FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ 22 ถึง 23.5 องศาเซลเซียส.....	54
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (STANDARD DEVIATION OF NOISE) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) กับอนุกรม FOCAL PLANE ARRAY (FPA) ของตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ .....	55
4.20 ผลการตรวจสอบการแยกขีดตำแหน่งเชิงเส้นด้วยแผ่นมาตรฐาน USAF 1951 RESOLUTION CALCULATOR กลุ่มที่ 0 และ 1 สำหรับคู่เส้น 1 ถึง 6 ประกอบด้วยสัญญาณภาพ ความสัมพันธ์ของการเปรียบเทียบการแยก (CONTRAST) ระหว่างแผ่นมาตรฐาน (-) กับสัญญาณตรวจวัดของระบบ (-) และความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความเปรียบเทียบ (MODULATION TRANSFER FUNCTION) กับค่าความถี่เชิงตำแหน่ง (SPATIAL FREQUENCY) ของระบบ.....	57
4.21 ส่วนประกอบของระบบตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์.....	58
ก.1 โปรแกรมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ Raw Intensity และ FPA Temperature.....	66
ก.2 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการหมุนของเกรตติ้งเลี้ยวเบนเพื่อตรวจวัดสัญญาณ.....	67
ก.3 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการหมุนของเกรตติ้งเลี้ยวเบนเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ .....	67
ก.4 โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าความยาวคลื่นประจำมุมหมุนเกรตติ้งเลี้ยวเบน.....	67



สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.5 โปรแกรมสำหรับการแสดงผลค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นและโปรแกรมสำหรับการบันทึกข้อมูลสัญญาณสเปกตรัมชนิด FULL FILE และ AVERAGE FILE .....	68
ก.6 โปรแกรมสำหรับการหาตำแหน่งการเลี้ยวเบนของ ZERO-ORDER .....	68
ก.7 SDK สำหรับการตรวจวัดค่าสัญญาณ RAW 16 BIT ของ INO FPA MICROBOLOMETER.....	69
ก.8 SDK สำหรับการตรวจวัดค่าสัญญาณ FPA TEMPERATURE ของ INO FPA MICROBOLOMETER ...	69
ก. 9 SDK สำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์ด้วยสัญญาณพัลส์ ของ LINUX.....	70
ก.10 SDK สำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ของ LINUX.....	70
ข.1 GRAPHIC USER INTERFACE สำหรับระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด ด้วยภาษา PYTHON.....	73

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$h$	= ค่าคงที่ของพลังค์ [ $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ ]
$\nu_{\text{photon}}$	= ความถี่ของโฟตอน [1/s]
FWHM	= Full width at half maximum
E <sub>electronic transition</sub>	= พลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์
E <sub>vibrational</sub>	= พลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการสั่น
E <sub>rotational</sub>	= พลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการหมุน
$d$	= ระยะระหว่างร่องของเกรตติงเลี้ยวเบน
OPO	= แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ Optical parametric oscillator
$n$	= อันดับการเลี้ยวเบนของคลื่น
lp/mm	= Line-pairs per millimeter
$\alpha$	= มุมตกกระทบของคลื่นแสงกับเส้นปกติของระนาบเกรตติงเลี้ยวเบน
$\beta$	= มุมสะท้อนของคลื่นแสงกับเส้นปกติของระนาบเกรตติงเลี้ยวเบน
$\lambda$	= ความยาวคลื่น
NIR	= ช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared)
MIR	= ช่วงอินฟราเรดย่านกลาง (Mid-infrared)
FIR	= ช่วงอินฟราเรดย่านไกล (Far-infrared)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MCT	= Mercury Cadmium Telluride
InSb	= Indium antimonide
DLaTGS	= Deuterated lanthanum alanine-doped triglycine sulfite
VOx	= Vanadium Oxide
NETD	= Noise Equivalent Temperature Difference
ROIC	= Readout integrated circuit
FPA	= Focal Plane Array
PS	= Polystyrene
IR	= อินฟราเรด (Infrared)
FPS	= อัตราเฟรม (Frame per second)
CCD	= Charge coupled Device
DAQ	= Data Acquisition
GUI	= Graphical User Interface

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการตรวจวิเคราะห์วัสดุทางด้านเกษตรและอาหารมีการพัฒนาประสิทธิภาพของเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์โดยการใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่างที่นำไปตรวจวิเคราะห์ จึงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและจำนวนตัวอย่างในการตรวจวิเคราะห์ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน โดยเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ย่านที่มองเห็นได้ (Visible) จนถึงย่านอินฟราเรด (Infrared) เป็นเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ที่มีความรวดเร็วและความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์สูง อาทิเช่น การแยกสายพันธุ์ของเมล็ดข้าวสารด้วยเทคนิคการวัดค่าสเปกตรัมการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดที่มีค่าความยาวคลื่นความจำเพาะเจาะจงต่อเมล็ดข้าวสารแต่ละสายพันธุ์ที่ต่างกันออกไป การตรวจหาเชื้อ *Escherichia coli* ที่ติดบนพื้นผิวของผักซึ่งเป็นเชื้อที่มีผลต่อความปลอดภัยทางอาหารด้วยการใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ (Siripatrawan, Makino, Kawagoe and Oshita, 2011) รวมถึงการตรวจวิเคราะห์เชื้อราบนผิวของผลแอปเปิ้ล (Kim, Chen and Mehl, 2001) และการตรวจวิเคราะห์หาชั้นของสารเคลือบแว็กซ์บนผิวของผลไม้ (Veraverbeke, Lammertyn, Nicola and Irudayaraj, 2005) ด้วยเทคนิคเดียวกัน ซึ่งเทคนิคกล่าวมานี้คือเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทาง สเปกโทรสโกปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ตรวจวิเคราะห์เกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไปด้วยการดูดกลืนหรือการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งการตรวจวัดสัญญาณทางสเปกโทรสโกปีนั้นจะตรวจวัดได้จากค่าความยาวคลื่นที่มีพลังงานเหมาะสมค่าหนึ่งต่อสารตัวอย่าง โดยอะตอมหรือโมเลกุลของสารตัวอย่างจะดูดกลืนหรือปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความยาวคลื่นจำเพาะเจาะจงต่อสารตัวอย่างนั้น ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีเพื่อหาองค์ประกอบที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ความยาวคลื่นจำเพาะเจาะจงที่อยู่ภายในสารตัวอย่างนั้นได้ ต้องมีเทคนิคและเครื่องมือที่ใช้สำหรับการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น

การแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ได้สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นในแต่ละช่วงย่านคลื่นจะมีความกว้างของค่าสัญญาณสเปกตรัมแตกต่างกัน อาทิเช่น ช่วงย่านคลื่นอัลตราไวโอเล็ตมีค่าความยาวคลื่นระหว่าง 200 ถึง 400 นาโนเมตร มีค่าความกว้างของสัญญาณสเปกตรัม 200 นาโนเมตร ช่วงย่านคลื่นย่านที่มองเห็นได้มีค่าความยาวคลื่นระหว่าง 400 ถึง 700 นาโนเมตร มีค่าความกว้างของสัญญาณสเปกตรัม 300 นาโนเมตร และช่วงย่านคลื่นย่านที่อินฟราเรดมีค่าความยาวคลื่นระหว่าง 1,000 ถึง 10,000 นาโนเมตร โดยจะแบ่งเป็นช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ อินฟราเรดย่านกลางและอินฟราเรดย่านไกล มีค่าความกว้างของสัญญาณสเปกตรัมอย่างน้อย 1000 นาโนเมตร โดยการใช้เทคนิคการแยกความยาวคลื่นด้วยหลักการ Czerny-Turner Spectrometer นั้นมีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวเบนประจำความยาวคลื่น เนื่องจากขนาดของความกว้างตัวตรวจวัดสัญญาณนั้นมีค่าจำกัด โดยการตรวจวัดมุมเลี้ยวเบนประจำความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านที่มองเห็นได้สามารถตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมได้ทั้งย่านความยาวคลื่น สำหรับการตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมในช่วงคลื่นย่านที่อินฟราเรดที่มีค่าความกว้างของสัญญาณสเปกตรัมอย่างน้อย 1000 นาโนเมตรนั้น จึงทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมได้ทั้งย่านความยาวคลื่น ดังนั้น การตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมในช่วงคลื่นย่านที่อินฟราเรดจึงต้องใช้เทคนิคเพิ่มเติมจากหลักการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ Czerny-Turner Spectrometer ด้วยอัลกอริทึมการหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการแยกสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น

สำหรับการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมของสเปกโตรมิเตอร์ในย่านอินฟราเรดโดยทั่วไป Mercury cadmium telluride (MCT) หรือ Indium antimonide (InSb) หรือ Deuterated lanthanum alanine-doped triglycine sulfat (DLaTGS) (Lanzarotta, Marcott, Story, Dowrey and Sommer, 2012) ถูกใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณ โดยเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สูง ซึ่งส่วนมากจะเป็นตัวตรวจวัดแบบ 1 พิกเซล ประกอบด้วยระบบทำความเย็นไนโตรเจนเหลวและมีราคาต้นทุนค่อนข้างสูง ดังนั้น ไมโครโบลมิเตอร์ที่เป็นตัวตรวจวัดชนิดอาร์เรย์ ซึ่งไม่มีการระบายความร้อนด้วยไนโตรเจนเหลวและมีราคาต่ำกว่า จึงเป็นทางเลือกสำหรับการใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณของสเปกโตรมิเตอร์ในย่านอินฟราเรด (William, Simon and Steven, 2012; Leijtens et al., 2017) โดยในปัจจุบันตัวตรวจวัดไมโครโบลมิเตอร์ที่ชนิดอาร์เรย์มีขนาดพิกเซลค่อนข้างเล็ก มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคุณลักษณะที่สำคัญ อาทิเช่น ความต่างของอุณหภูมิเทียบเท่าสัญญาณรบกวน (NETD) ต่ำ (Fisette et al., 2017; Tremblay et al., 2018) โดยคุณสมบัติเหล่านี้ช่วยปรับปรุงความละเอียดเชิงสเปกตรัม ความไว และช่วงความยาวคลื่นของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์อย่างมาก



ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยหลักการเลี้ยวเบนแสง การสร้างระบบเก็บสัญญาณสเปกตรัมและการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบควบคุมเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงร่วมกับการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิดไม่มีระบบระบายความร้อนไมโครโพลมิเตอร์ชนิดอาเรย์สำหรับงานทางสเปกโทสโคปีในช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรด โดยการสร้างอัลกอริทึมเพื่อควบคุมและประมวลผลสำหรับผู้ใช้งานด้วยภาษา NI LabView หรือ Python ที่มีการตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น การตรวจสอบความการแยกชัดความยาวคลื่น โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ Optical Parametric Oscillator (OPO) ซึ่งสามารถกำหนดค่าความยาวคลื่นในช่วงคลื่นย่านอินฟราเรดและมาตรฐานพอลิสไตรีนสำหรับย่านอินฟราเรด และการตรวจสอบการแยกชัดเชิงตำแหน่งของระบบการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยแผนภาพทดสอบการแยกชัด USAF 1951 Resolution Calculator

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดด้วยหลักการเลี้ยวเบน
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด โดยอินทิเกรตโปรแกรมไว้ในซอฟต์แวร์ข้อ 1.2.2
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดด้านเทคนิคของการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลมิเตอร์สำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบน

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดโดยใช้เกรตติงเลี้ยวเบนและตัวอย่างทดลองกระจกเรียบผิวสะท้อนเคลือบด้วยอลูมิเนียม

1.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดโดยใช้มาตรฐานพอลิสไตรีน (Polystyrene)

1.3.3 งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Zemax optical studio ในการออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรม NI LabView ในการควบคุมและประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปี

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 อัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีที่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรงตามค่ามาตรฐาน

1.4.2 สามารถนำอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปี ไปประยุกต์ใช้กับงานการด้านตรวจวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)

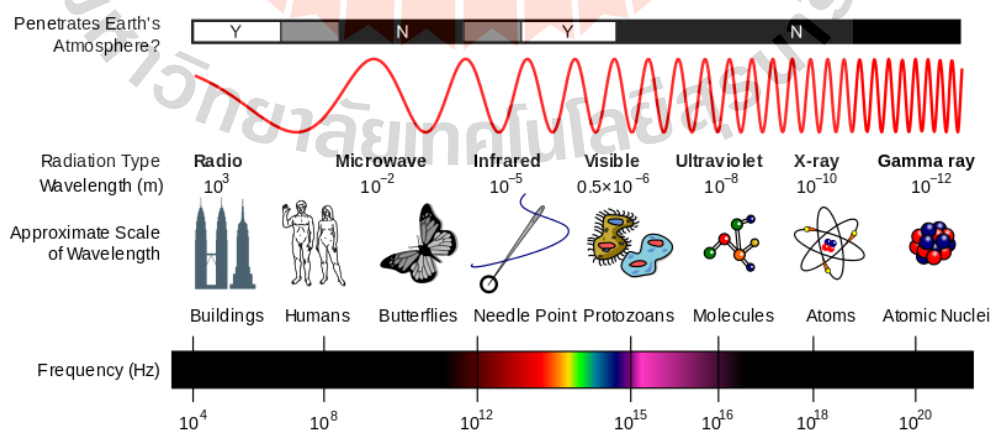
แสงเคลื่อนที่ไปในอวกาศด้วยความเร็ว 300,000,000 เมตร/วินาที ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค เมื่อเรากล่าวถึงแสงในคุณสมบัติความเป็นคลื่น เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) และเมื่อกล่าวถึงแสงในคุณสมบัติของอนุภาค เรียกว่า โฟตอน (Photon) เป็นอนุภาคที่ไม่มีมวล แต่เป็นพลังงาน โดยใช้ทฤษฎีควอนตัมของพลังค์กำหนดค่าพลังงานของโฟตอนเป็นค่าเฉพาะสำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นหรือความถี่ค่าหนึ่ง ดังสมการที่ 2.1

$$E_{\text{photon}} = h\nu_{\text{photon}} \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

โดยที่  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ [ $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ ]

$\nu_{\text{photon}}$  คือ ความถี่ของโฟตอน [ $1/\text{s}$ ]

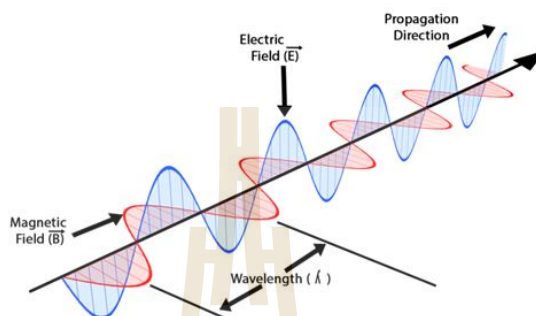
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่มีช่วงความยาวคลื่นและความถี่อยู่หลายช่วงหรือที่เรียกว่า สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยช่วงคลื่นวิทยุซึ่งเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสูงสุด (พลังงานต่ำสุด) ถึงคลื่นรังสีแกมมาซึ่งเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุด (พลังงานสูงสุด) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum)

(ที่มา : <https://www.practicalpainmanagement.com/electromagnetic-treatments>, 2011)

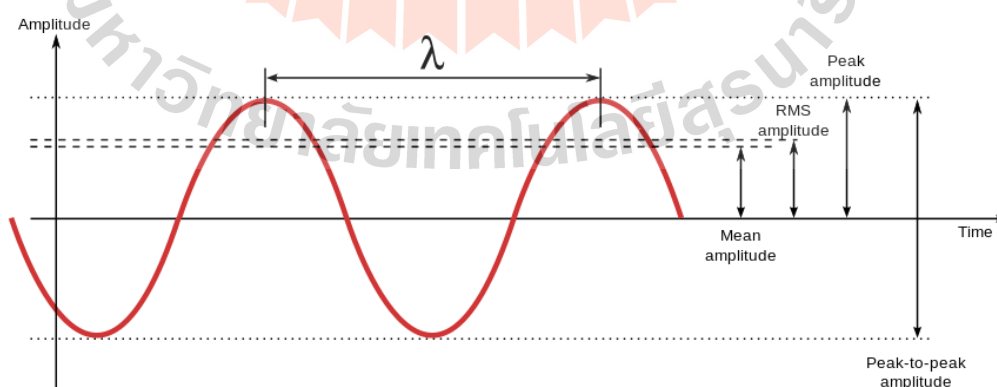
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางประกอบด้วยรังสีไฟฟ้าและรังสีแม่เหล็กที่กวัดแกว่ง (Oscillate) ในระนาบตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)

(ที่มา : <https://classnotes.ng/electromagnetic-waves-physics-sss3>, 2020)

คุณสมบัติเชิงคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยเส้นแรงไฟฟ้าที่ทำอันตรกิริยากับสสาร ความถี่ (Frequency) ความยาวคลื่น (Wavelength,  $\lambda$ ) และแอมพลิจูด (Amplitude) ซึ่งความถี่ของการเคลื่อนที่คลื่น คือเศษส่วนของคาบเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไป 1 ความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่น คือ ระยะระหว่างจุดยอด (Peak amplitude) คลื่นสองจุดที่อยู่ติดกันมีหน่วยเป็นเมตรหรือนิยมเรียกว่าเลขคลื่นโดยจะใช้หน่วยเป็นส่วนกลับของความยาวคลื่นคือส่วนกลับของเมตรซึ่งถ้าคลื่นมีความยาวคลื่นมากเลขคลื่นจะมีค่าน้อย คลื่นมีความยาวคลื่นน้อยเลขคลื่นจะมาก และแอมพลิจูด คือ ความสูงของจุดยอดคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

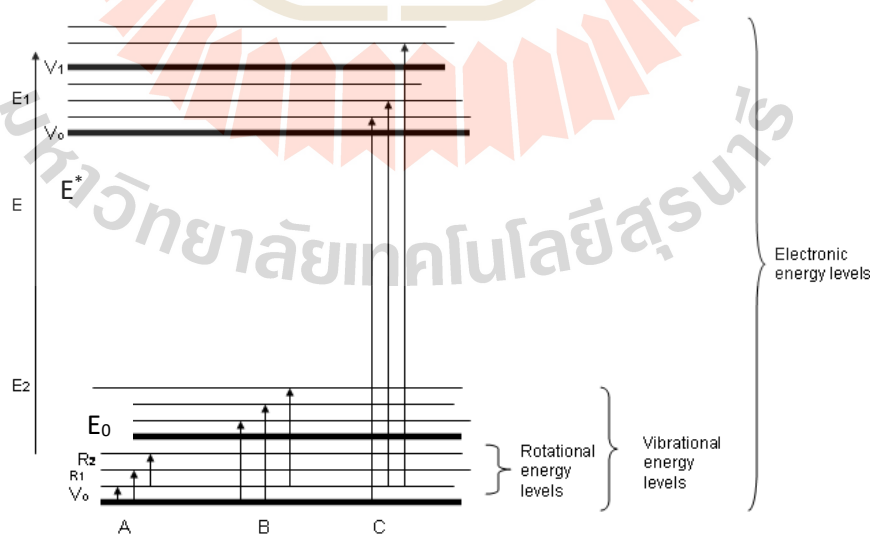
(ที่มา : <https://theory.labster.com/amplitude-wavelength-waw/>, 2022)

## 2.2 สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy)

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังสารที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างคลื่นแสงและสารขึ้น พบว่าคลื่นแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนส่องผ่าน บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ บางส่วนเกิดการเปล่งแสง และบางส่วนเกิดการกระเจิงแสง ซึ่งเกิดขึ้นจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าหรือสถานะเร้า (Excited states) ซึ่งข้อมูลของสารที่ถูกกระตุ้นจะถูกวัดปริมาณการดูดกลืนพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือวัดการปลดปล่อยพลังงานเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของสารกลับคืนจากสถานะกระตุ้นสู่สถานะพื้น โดยพลังงานในการเปลี่ยนสถานะ (Transition) ที่จะทำให้โมเลกุลของสารไปอยู่ในสถานะเร้าจะมีค่าพลังงานที่แน่นอน ประกอบด้วย 3 ระดับ คือ การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุล (Rotational transition) การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrational transition) และการเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุล (Electronic transition) ดังสมการที่ 2.2

$$E = E_{\text{electronic}} + E_{\text{vibrational}} + E_{\text{rotational}} \quad (2.2)$$

โดยพลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการหมุนจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการสั่นและพลังงานที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุล ตามลำดับจึงส่งผลให้การเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของการสั่นและการหมุนด้วยเสมอแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสถานะของระดับพลังงานจากสถานะพื้น ( $E_0$ ) สู่สถานะเร้า ( $E^*$ )

(ที่มา : <https://chem.libretexts.org/page/3732>, 2023)



- โดยที่ A คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะของระดับพลังงานระดับการหมุน (Rotational transition)  
 B คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะของระดับพลังงานระดับการสั่น (Vibrational transition)  
 C คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะของระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic transition)

ความเข้มของสัญญาณการดูดกลืนแสง (Absorption line) โดยอะตอมหรือโมเลกุลของสาร มีค่าขึ้นกับผลต่างจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ระหว่างระดับพลังงานต่างกัน ( $E_1$  และ  $E_2$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Boltzman จากสมการที่ 2.3 อัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในระหว่างระดับพลังงานต่างกัน 2 ระดับพลังงาน

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (2.3)$$

โดยที่  $n_2$  และ  $n_1$  คือ จำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในระดับพลังงาน  $E_2$  และ  $E_1$  ตามลำดับ

การที่แถบการดูดกลืนคลื่นแสงมีความกว้าง (broadening) มีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากหลักความไม่แน่นอนของ Heisenberg ปรากฏการณ์ความไม่แน่นอนของพลังงาน ( $\Delta E$ ) และเวลา ( $\Delta t$ ) ดังสมการที่ 2.4 (Natural broadening) อธิบายความไม่แน่นอนในรูปพลังงาน

$$\Delta E = \frac{h}{2\pi\Delta t} \quad (2.4)$$

ความกว้างของเส้นสเปกตรัม (Spectral line broadening) เกิดจากการที่คลื่นแสงทำอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลนั้นประกอบไปด้วยความถี่ต่างกันไปในระหว่างการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลที่ต่างกัน จากสมการที่ 2.5

$$\Delta\nu_{\text{natural}} = \frac{1}{2\pi\Delta t} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\Delta\nu_{\text{natural}}$  คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัม Natural broadening

$\Delta t$  คือ ช่วงเวลา ณ สถานะเร้า

นอกจาก Natural broadening การมีความกว้างของเส้นสเปกตรัมสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ ดอปเปลอร์ (Doppler broadening) และเนื่องจากความดัน (Pressure broadening)

โดยการมีความกว้างของเส้นสเปกตรัมเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ อาจเกิดขึ้นจากความร้อนของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งมีผลต่อพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลที่ดูดกลืนแสง ดังสมการที่ 2.6

$$\Delta v_{\text{doppler}} = v_0 \frac{2v(2RT \ln 2)}{c\sqrt{M}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\Delta v_{\text{doppler}}$  คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัม Doppler broadening

$v_0$  คือ ความถี่ในการดูดกลืนแสงของอะตอมหรือโมเลกุล

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ( $0.082057 \text{ [L atm K}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{]}$ )

T คือ อุณหภูมิ [K]

M คือ มวลอะตอมหรือโมเลกุล

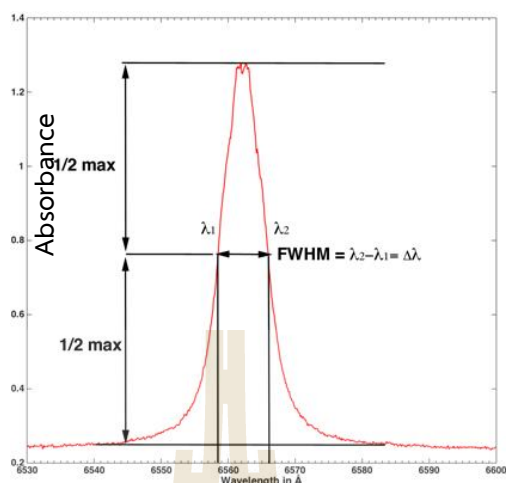
การเกิดความกว้างของเส้นสเปกตรัมเนื่องจากความดัน (Pressure broadening) เกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของสารนั้นๆ ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงคูอมบ์ ซึ่งทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิ (T) และความดัน (P) มีค่าเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีการชนกันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ช่วงเวลาในการเปลี่ยนระดับพลังงานหรือช่วงเวลาในสภาวะเร้าสั้นลง ( $\Delta t$ ) ดังสมการที่ 2.7 จากความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเส้นสเปกตรัม ( $\Delta v$ ) และช่วงเวลาสภาวะเร้า ( $\Delta t$ ) ดังสมการที่ 5 จึงส่งผลให้ความกว้างของเส้นสเปกตรัมเพิ่มขึ้น

$$\Delta v_{\text{pressure}} = 4\sigma^2 \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{(RMT)}} \cdot P \quad (2.7)$$

โดยที่  $\Delta v_{\text{pressure}}$  คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัม Pressure broadening

$\sigma$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ชนกันของอะตอมหรือโมเลกุล

จากที่กล่าวถึงการเกิดความกว้างของเส้นสเปกตรัมที่ประกอบไปด้วยความถี่เดียวหรือหลายความถี่รวมกันจะวัดความกว้างของเส้นสเปกตรัมโดยวัดความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงสเปกตรัม หรือ Full width at half maximum (FWHM) หรือ  $\frac{1}{2}$  max แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยจะเรียกว่าความกว้างของเส้นสเปกตรัม (Spectral linewidth or Spectral bandwidth)



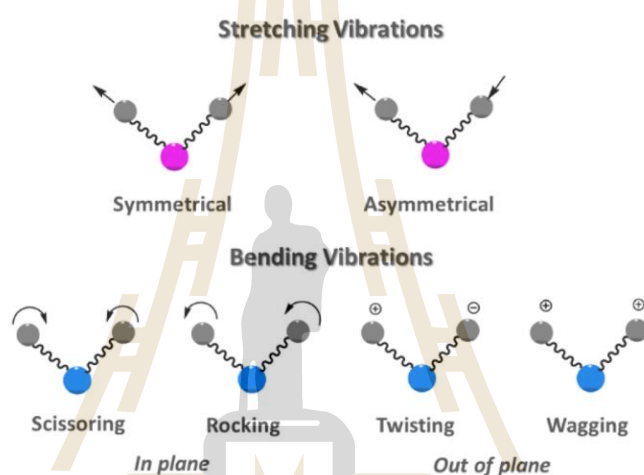
รูปที่ 2.5 ความกว้างของเส้นสเปกตรัม (Spectral linewidth or Spectral bandwidth) ที่ Full width at half maximum (FWHM)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) เป็นการวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแสงในย่านอินฟราเรดและสาร ที่ต้องการวิเคราะห์ การเกิดอันตรกิริยานั้นจะเกิดขึ้นระหว่างคลื่นแสงอินฟราเรดและโมเลกุลของสาร โดยจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นในระดับพลังงานของการสั่นและการหมุนเท่านั้น เนื่องจากพลังงานของคลื่นแสงย่านอินฟราเรดนั้นระดับพลังงานต่ำ จึงไม่สามารถกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นในระดับพลังงานของการเกิดอิเล็กตรอนแทรนซิชั่นได้ โดยคลื่นแสงในย่านอินฟราเรดจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลักๆ ได้แก่ ช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared, NIR), ช่วงอินฟราเรดย่านกลาง (Mid-infrared, MIR) และช่วงอินฟราเรดย่านไกล (Far-infrared, FIR) โดยช่วงอินฟราเรดทั้ง 3 ช่วงแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นและมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ช่วงคลื่นแสงย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่นแสงย่านอินฟราเรด	ช่วงความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ )	ช่วงเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )
ช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared, NIR)	0.78 ถึง 2.5	12800 ถึง 4000
ช่วงอินฟราเรดย่านกลาง (Mid-infrared, MIR)	2.5 ถึง 50	4000 ถึง 200
ช่วงอินฟราเรดย่านไกล (Far-infrared, FIR)	50 ถึง 1000	200 ถึง 10

การถูกกระตุ้นของโมเลกุลของสารด้วยคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีค่าความถี่ตรงกับค่าความถี่ของการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น จะเกิดกับโมเลกุลของสารที่เกิดการสั่นด้วยพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสารโดยพลังงานที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสงอินฟราเรดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่หรือ Dipole moment ของโมเลกุลของสาร ดังนั้นสำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอะตอมแตกต่างกัน โมเลกุลของสารนั้นจะสามารถตอบสนองต่อคลื่นแสงอินฟราเรดได้ (IR-active) และสำหรับโมเลกุลของสารที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่จะไม่ตอบสนองต่อคลื่นแสงอินฟราเรด (IR-inactive) อาทิเช่น  $N_2$   $Cl_2$  ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมสองอะตอมที่เหมือนกัน



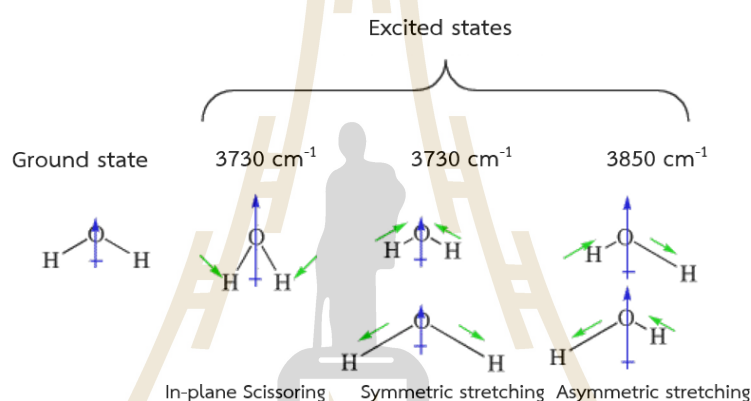
รูปที่ 2.6 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล

(ที่มา : <https://chem.libretexts.org/page/1845>, 2023)

การสั่นแบบพื้นฐาน (fundamental vibration) ของพันธะของโมเลกุล ซึ่งโดยปกติพันธะจะเกิดการสั่นแบบต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา โดยการสั่นของพันธะแบ่งออกเป็น การสั่นแบบยืด (stretching) และการสั่นแบบบิดงอ (bending) แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยการสั่นแบบยืดเป็นการสั่นแบบทิศทางยืดเข้าหรือหดและยืดออกจาก การเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะของโมเลกุลจะแบ่งออกเป็น การยืด 2 แบบ คือ การยืดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) และการสั่นแบบบิดงอเป็นการสั่นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมของพันธะของโมเลกุลจะแบ่งออกเป็น การบิดงอ 4 แบบ คือ in plane scissoring, in plane rocking, out of plane twisting และ out of plane wagging

การคำนวณจำนวนของรูปแบบของการสั่นแบบพื้นฐานจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ สำหรับ Linear Molecules มีจำนวนของรูปแบบของการสั่น  $(3N - 5)$  degrees of freedom อาทิเช่น  $CO_2$  จะมีการสั่นของโมเลกุล 4 รูปแบบ และสำหรับ Non-Linear molecules มีจำนวนของรูปแบบของการสั่น  $(3N - 6)$  degrees of freedom อาทิเช่น  $H_2O$  จะมีการสั่นของโมเลกุล 3 รูปแบบ โดยใช้

เทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี สัญญาณสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งโมเลกุลของน้ำที่สถานะพื้นเมื่อได้รับพลังงานจำเพาะเจาะจงของคลื่นอินฟราเรดไปยังสถานะกระตุ้น โดยมีความสัมพันธ์กับการเกิดการสั่นของโมเลกุลแบบ asymmetric stretching ที่เลขคลื่น  $3850\text{ cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่น  $2597\text{ nm}$ , การเกิดการสั่นของโมเลกุลแบบ symmetric stretching ที่เลขคลื่น  $3730\text{ cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่น  $2681\text{ nm}$  และการเกิดการสั่นของโมเลกุลแบบ in plane Scissoring ที่เลขคลื่น  $1711\text{ cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่น  $5845\text{ nm}$  นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าพลังงานของคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นจากสมการที่ 1 อาทิเช่นการคำนวณพลังงานคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นแบบ symmetric stretching ที่เลขคลื่น  $3730\text{ cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่น  $2681\text{ nm}$  จะมีค่าพลังงาน  $7.4 \times 10^{-23}\text{ kJ}$

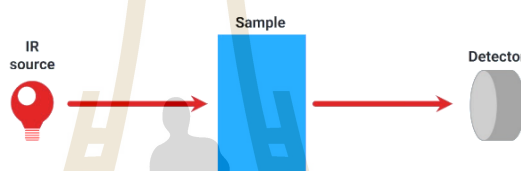


รูปที่ 2.7 โมเลกุลของ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่สถานะพื้น (Ground state) และการสั่นแบบพื้นฐาน 3 รูปแบบที่สถานะถูกกระตุ้น (Excited states) ที่คลื่นอินฟราเรดเลขคลื่น  $1711\text{ cm}^{-1}$  (In plane Scissoring),  $3730\text{ cm}^{-1}$  (Symmetric stretching) และ  $3850\text{ cm}^{-1}$  (Asymmetric stretching)

(ที่มา : <http://butane.chem.uiuc.edu/genchem1/l15/>, 2011)

การตรวจวัดสัญญาณคลื่นแสงสำหรับอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นการตรวจวัดสัญญาณหลังจากสารตัวอย่างดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดที่ตกกระทบ โดยลักษณะของสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นที่ออกมาจะนิยมแสดงผลของสัญญาณการดูดกลืนประจำความยาวคลื่นอินฟราเรด ซึ่งผลของสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดจะแสดงออกมาในรูปของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นที่มีความจำเพาะต่อความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนพร้อมทั้งแสดงแถบสเปกตรัมการดูดกลืนที่แคบโดยขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะของสารที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างสำหรับอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่าน (Transmission), การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบ ATR (Attenuated Total Reflection) และการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบสะท้อน (Reflection) โดยการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่านเป็นรูปแบบดั้งเดิมที่มาพร้อมกับอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีด้วยการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรด

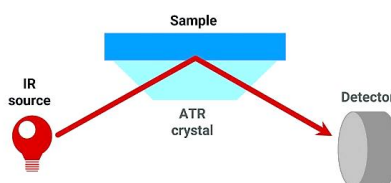
ส่องผ่านตัวอย่างทดลองแล้วทำการตรวจวัดสัญญาณการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดจากสัญญาณที่เหลือจากการส่องผ่านตัวอย่างทดลองตกกระทบตัวตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 2.8 เนื่องด้วยการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่านตัวอย่างทดลองตรวจวัดสัญญาณคลื่นอินฟราเรดที่เหลือจากการดูดกลืนจึงไม่เหมาะสมกับตัวอย่างทดลองที่มีความหนามากกว่า  $15\ \mu\text{m}$  สำหรับตัวอย่างทดลองที่เป็นของแข็ง โดยหากตัวอย่างมีความหนามากเกินไปจะทำให้การตรวจวัดสัญญาณจับสัญญาณที่ต่ำมากหรือเกิดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดของตัวอย่างทดลองทั้งหมด รวมไปถึงการตรวจวัดตัวอย่างที่เป็นของเหลวต้องทำการลดความเข้มข้นของของเหลวลงเพื่อให้คลื่นอินฟราเรดส่องผ่านตัวอย่างทดลองของเหลวเข้าสู่ตัวตรวจวัด ดังนั้นรูปแบบการตรวจวัดแบบส่องผ่านทางอินฟราเรดสเปกโทสโคปีจึงเหมาะสมกับตัวอย่างทดลองบางชนิดเท่านั้น



รูปที่ 2.8 การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่าน (Transmission)

(ที่มา : [https://www.bruker.com/sections/section\\_142939616](https://www.bruker.com/sections/section_142939616), 2023)

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบ ATR เป็นเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างโดยการส่งคลื่นอินฟราเรดผ่านผลึกคริสตัลที่มีค่าดัชนีการหักเหสูง จากนั้นคลื่นอินฟราเรดที่ผ่านผ่านผลึกคริสตัลตกกระทบตัวอย่างทดลองและคลื่นอินฟราเรดที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่างทดลองจะสะท้อนกลับผ่านผลึกคริสตัลอีกครั้งเข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยผลึกคริสตัล Diamond, Germanium และ Zinc selenide สำหรับคลื่นอินฟราเรด ซึ่งการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบ ATR สามารถวิเคราะห์ในตัวอย่างทดลองที่ไม่เหมาะสมกับการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบส่องผ่านและคลื่นอินฟราเรดจะสามารถทะลุพื้นผิวของตัวอย่างทดลองเข้าไปได้  $0.3$  ถึง  $3\ \mu\text{m}$  (ขึ้นกับความยาวคลื่นอินฟราเรดในการตรวจวิเคราะห์ ตัวอย่างทดลองและวัสดุของผลึกคริสตัล) และจะให้สัญญาณการตรวจวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง

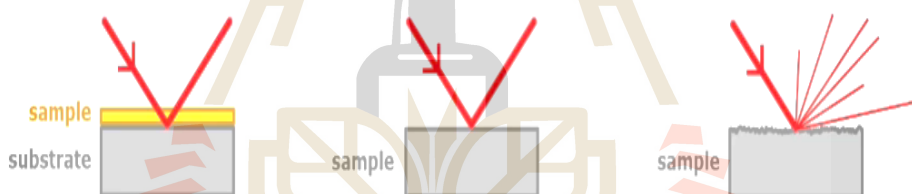


รูปที่ 2.9 การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบ ATR (Attenuated Total Reflection)

(ที่มา : [https://www.bruker.com/sections/section\\_142939616](https://www.bruker.com/sections/section_142939616), 2023)



การตรวจวิเคราะห์การสะท้อนบนพื้นผิวของคลื่นอินฟราเรด โดยจะใช้กับตัวอย่างที่ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วยการส่องผ่านได้และสามารถประยุกต์ใช้กับการตรวจวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเชิงภาพ ซึ่งการสะท้อนบนพื้นผิวประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ Specular Reflectance และ Diffuse Reflectance โดยการสะท้อนที่มุมของคลื่นแสงตกกระทบตัวอย่างเท่ากับมุมของคลื่นแสงที่สะท้อนออกจากตัวอย่าง ซึ่งจะเกิดกับตัวอย่างที่มีลักษณะผิวเรียบ เรียกว่า Specular Reflectance โดยการตรวจวัดค่า Specular Reflectance จะมีการตรวจวัดค่า 2 แบบ คือ แบบ Reflection-Absorption และแบบ Specular Reflection ซึ่งแบบ Reflection-Absorption จะใช้ตรวจวัดกับตัวอย่างที่มีสารเคลือบบนผิวตัวอย่าง (Coating) เมื่อคลื่นอินฟราเรดคลื่นที่ผ่านชั้นสารเคลือบตกกระทบผิวของตัวอย่างจากนั้นจะสะท้อนกลับมาผ่านที่ชั้นสารเคลือบนั้นอีกครั้งแล้วออกจากตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.10 (ก) ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดหรือคุณสมบัติสารที่เคลือบตัวอย่าง รวมถึงความหนาของสารเคลือบตัวอย่าง แบบ Specular Reflection จะใช้ตรวจวิเคราะห์กับตัวอย่างที่มีผิวเรียบและไม่มีสารเคลือบผิวตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.10 (ข) และในส่วนของ Diffuse Reflectance จะใช้ตรวจวัดกับตัวอย่างที่มีผิวของการสะท้อนไม่เรียบ ซึ่งเมื่อคลื่นอินฟราเรดตกกระทบตัวอย่างมุมที่สะท้อนออกจากตัวอย่างจะไม่เท่ากับมุมที่ตกกระทบตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.10 (ค)

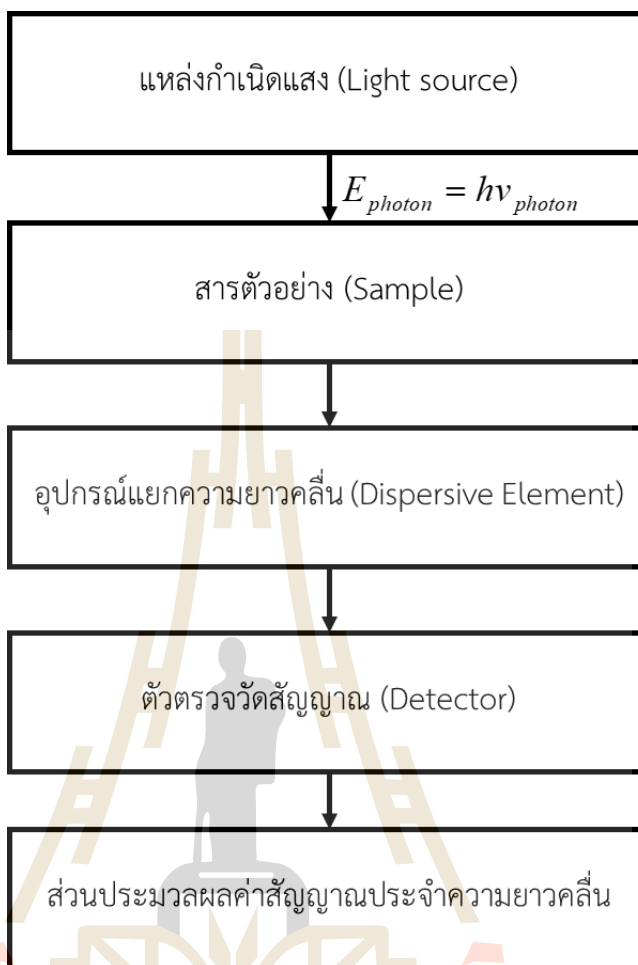


รูปที่ 2.10 การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแบบสะท้อน (Reflection) (ก) Reflection-Absorption (ข) Specular Reflection และ (ค) Diffuse Reflection  
(ที่มา : [https://www.bruker.com/sections/section\\_142939616](https://www.bruker.com/sections/section_142939616), 2023)

### 2.3 สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

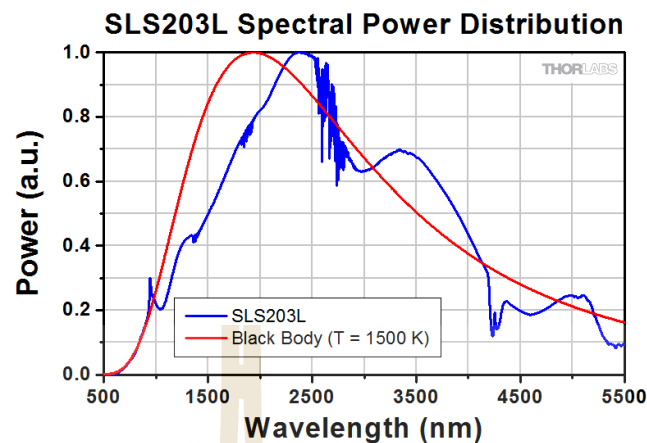
การวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโคปีโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวิเคราะห์การตอบสนองของสารเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นจำเพาะเจาะจง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีส่วนประกอบพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโคปีในย่านอินฟราเรดต้องมีแหล่งกำเนิดแสงเพื่อกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการกระตุ้นสารตัวอย่าง จากนั้นจะเข้าสู่อุปกรณ์ในการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะเข้าตัวตรวจวัดและส่วนประมวลผลค่าสัญญาณประจำความยาวคลื่น





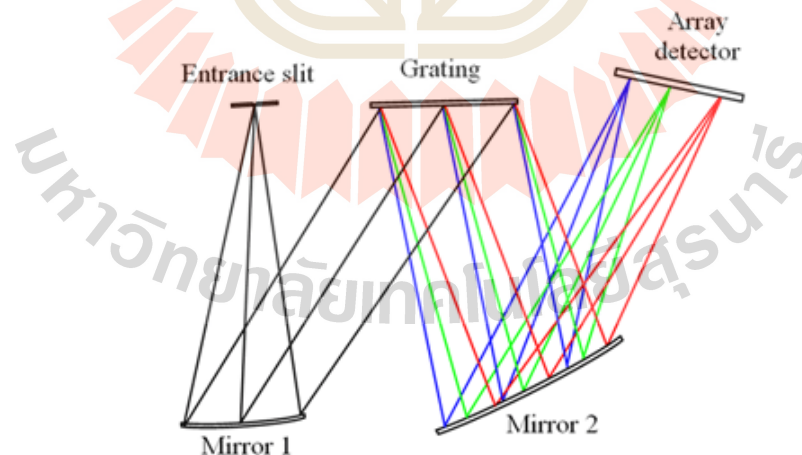
รูปที่ 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องมือการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโคปี

แหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโคปีจะต้องมีย่านความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดและควรให้ค่าความเข้มสม่ำเสมอตลอดย่านความยาวคลื่น ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงมีทั้งชนิดที่กำเนิดแสงออกมาเป็นย่านความยาวคลื่นสเปกตรัมกว้าง (Broadband Light source) และชนิดที่กำเนิดแสงออกมาเป็นย่านความยาวคลื่นสเปกตรัมแคบ (Narrowband Light source) โดยแหล่งกำเนิดแสงในย่านคลื่นอินฟราเรด นิยมใช้แหล่งกำเนิดแสง Global Light source เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดสเปกตรัมกว้าง (Broadband Light source) ซึ่งใช้ไฟฟ้าในการเผาแท่งเซรามิกที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ให้ร้อนถึง 1200-1500 องศา จากนั้นจะเกิดการคายคลื่นแสงอินฟราเรดออกมาแบบต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่น 500-9000 นาโนเมตรและมีค่าพลังงานประจำความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.12



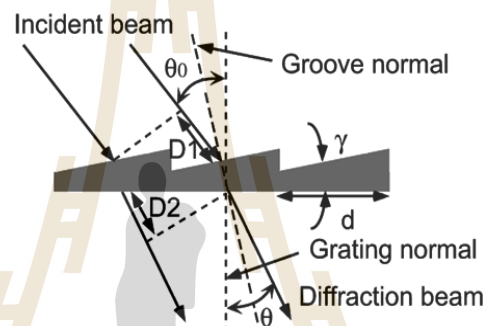
รูปที่ 2.12 ค่าพลังงานประจำความยาวคลื่นแหล่งกำเนิดแสง Global SLS203  
(ที่มา : [https://www.thorlabs.com/objectgroup\\_id=7269](https://www.thorlabs.com/objectgroup_id=7269), 2022)

เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นแสงกระตุ้นสารตัวอย่าง คลื่นแสงที่สะท้อนจากสารตัวอย่างจะเข้าสู่อุปกรณ์ในการแยกความยาวคลื่นชนิดปริซึมและชนิดเกรตติ้งเลี้ยวเบนโดยใช้หลักการ Czerny-Turner ซึ่งมีส่วนประกอบของช่องเปิดแสงเข้า (Entrance slit) ทำหน้าที่กำหนดปริมาณของคลื่นแสง (Photon flux) ที่จะเข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการแยกขีดเชิงสเปกตรัมของระบบ เกรตติ้งเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) กระจกที่ใช้ในการโฟกัสคลื่นแสง (Mirror 1 และ 2) และตัวตรวจวัดสัญญาณชนิดอาร์เรย์ (Array detector) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Czerny-Turner Spectrometer  
(ที่มา : Chimenti, 2013)

เกรตติงเลี้ยวเบนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในระบบ ทำหน้าที่ในการแยกความยาวคลื่นของคลื่นแสง เกรตติงเลี้ยวเบนจำแนกได้ 2 ประเภท คือ เกรตติงแบบส่องผ่าน (Transmission grating) และเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) โดยลักษณะของเกรตติงแบบส่องผ่านสร้างจากวัสดุที่เป็นแก้ว เช่น Schott B270 จาก Thorlabs เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะที่โปร่งใน ผิวของเกรตติงเป็นร่องขนานกันและห่างกันด้วยระยะ  $d$  โดยแสงที่ตกกระทบ (Incident beam) เกรตติงแบบส่องผ่านจะทำมุมกับเส้นปกติของเกรตติง (Grating normal) ที่ตั้งฉากกับระนาบของเกรตติง จากนั้นจะผ่านเข้าไปยังเกรตติงและออกด้านหลังของเกรตติง แสดงดังรูปที่ 2.14

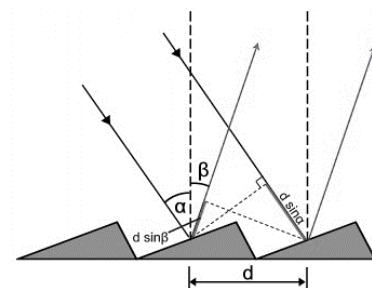


รูปที่ 2.14 เกรตติงแบบส่องผ่าน (Transmission grating)  
(ที่มา : Wilson, Que and Gianchandani, 2005)

เกรตติงแบบสะท้อนมีลักษณะของผิวหน้าเกรตติงเป็นร่อง (Groove or Blaze) ที่ขนานและติดกันมีจำนวนร่องต่อความยาวเกรตติง เช่น 150 หรือ 300 Groove/Millimeter ที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุที่มีค่าการสะท้อนสูงทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแสงที่ตกกระทบกับเกรตติงเลี้ยวเบนออกจากเกรตติงเลี้ยวเบนในมุมประจำความยาวคลื่นที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.15 และสมการที่ 2.8 สมการของเกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating Equation)

$$n\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $d$  คือ ระยะระหว่างร่องของเกรตติงเลี้ยวเบน (Groove spacing)
- $\alpha$  คือ มุมตกกระทบของคลื่นแสงกับเส้นปกติของระนาบเกรตติงเลี้ยวเบน
- $\beta$  คือ มุมสะท้อนของคลื่นแสงกับเส้นปกติของระนาบเกรตติงเลี้ยวเบน
- $n$  คือ อันดับการเลี้ยวเบนของคลื่น
- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น



รูปที่ 2.15 เกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน (Reflection grating)

(ที่มา : Wilson, Que and Gianchandani, 2005)

การที่คลื่นแสงที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นตกกระทบกับเกรตติงเลี้ยวเบน การสะท้อนของคลื่นแสงที่สะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนจะสะท้อนด้วยมุมประจำความยาวคลื่นแสงที่ต่างกันของคลื่นแสงที่มีอันดับ (Order) เดียวกัน เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.8 สมการเกรตติงเลี้ยวเบนพบว่าความยาวคลื่นแสงที่สะท้อนออกจากเกรตติงที่มีคลื่นอันดับต่างกันสามารถสะท้อนออกจากเกรตติงด้วยมุมสะท้อนที่ทำมุมกับเส้นเกรตติงปกติเดียวกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าที่มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 30 องศา คลื่นแสงความยาวคลื่น 1.607 ไมโครเมตร ในคลื่นอันดับที่  $n=1$  (The first-order diffraction, 1<sup>st</sup>-order) มีมุมสะท้อนเท่ากับคลื่นแสงความยาวคลื่น 0.803 ไมโครเมตร ในคลื่นอันดับที่  $n=2$  (The second-order diffraction, 2<sup>nd</sup>-order) และมีมุมสะท้อนเท่ากับคลื่นแสงความยาวคลื่น 0.535 ไมโครเมตร ในคลื่นอันดับที่  $n=3$  (The third-order diffraction, 3<sup>rd</sup>-order) ที่มีมุมสะท้อนมีค่าเท่ากับ 15 องศา

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงการคำนวณค่าความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่คลื่นอันดับ 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> และ 3<sup>rd</sup>-order diffraction

$\alpha$	$\beta$	ความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ )		
		1 <sup>st</sup> -order	2 <sup>nd</sup> -order	3 <sup>rd</sup> -order
30	15	1.607	0.803	0.535
30	10	2.175	1.087	0.725
30	5	2.752	1.376	0.917

ความสามารถในการแยกความยาวคลื่นแสงที่เลี้ยวเบนออกจากเกรตติงเลี้ยวเบนที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันออกจากกัน เรียกว่า กำลังการแยก (Resolving Power) ของเกรตติง คือค่าขีดจำกัดของเกรตติง ซึ่งขึ้นค่าจำนวนร่องของเกรตติงเลี้ยวเบน อันดับ ผลต่างและค่าเฉลี่ยของคลื่นแสงที่อยู่ใกล้ดังสมการที่ 2.9

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nn \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือ กำลังการแยกของเกรตติง

$\lambda$  คือ ค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นแสงที่อยู่ใกล้กัน

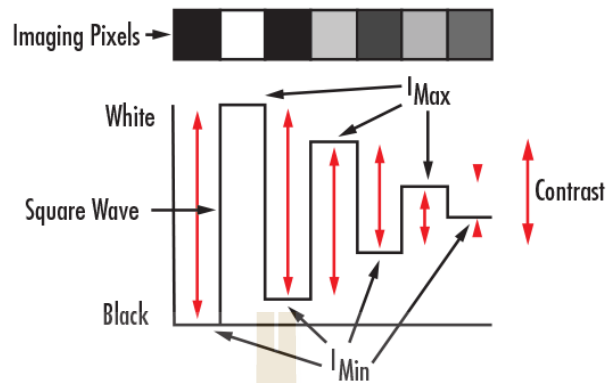
$\Delta\lambda$  คือ ค่าผลต่างของความยาวคลื่นแสงที่อยู่ใกล้กัน

n คือ อันดับของคลื่น

N คือ จำนวนร่องของเกรตติงเลี้ยวเบน

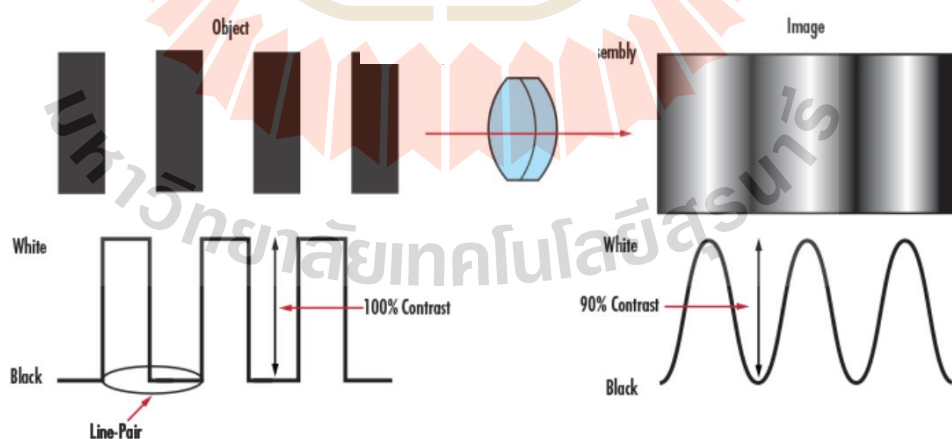
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสัญญาณเชิงภาพสำหรับระบบเชิงแสง โดยทั่วไปจะใช้วิธีการวัดฟังก์ชันความเปรียบต่าง (Modulation Transfer Function, MTF) สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและบ่งชี้คุณลักษณะของระบบเชิงแสง ไม่ว่าจะเป็นระบบเชิงแสงที่มีอุปกรณ์เชิงแสงเพียงหนึ่งชิ้นหรือระบบเชิงแสงที่มีอุปกรณ์เชิงแสงมากกว่าหนึ่งชิ้นที่มีความซับซ้อนสูง โดยพารามิเตอร์สำหรับการวัดฟังก์ชันความเปรียบต่างประกอบด้วย การแยกชัด (Resolution) และการเปรียบเทียบการแยก (Contrast หรือ Modulation) ของสัญญาณภาพที่ได้จากระบบเชิงแสง โดยการเปรียบเทียบการแยกของสัญญาณภาพเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณภาพสูงสุด ( $I_{\max}$ ) หรือสัญญาณภาพสีขาว (White, 100%) กับสัญญาณความเข้มต่ำสุด ( $I_{\min}$ ) หรือสัญญาณภาพสีดำ (Black, 0%) แสดงดังรูปที่ 2.16 ความเข้มของสัญญาณแสดงในลักษณะคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) สัมพันธ์กับลักษณะของสัญญาณภาพความเข้มสูงสุดและต่ำสุดประจำพิกเซลซึ่งค่าการเปรียบเทียบต่างการแยกของสัญญาณมีค่าลดลง โดยการคำนวณค่าการเปรียบเทียบการแยกของสัญญาณภาพด้วยสมการที่ 2.10

$$\% \text{Contrast or Modulation} = \left[ \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \right] \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบการแยก (Contrast or Modulation) ของสัญญาณภาพ  
(ที่มา : <https://edmundoptics.com/application-notes/imaging/contrast>, 2022)

สำหรับค่าการแยกชัดในการวัดฟังก์ชันความเปรียบต่างจะประกอบด้วยคู่เส้นขาวและดำที่มีระยะห่างระหว่างเส้นขาวและดำแตกต่างกันในหน่วยของ line-pairs per millimeter (lp/mm) หรือเรียกว่าความถี่ของเส้นคู่ขาวดำ แสดงดังรูปที่ 2.17 ภาพของวัตถุซึ่งมีค่าการแยกชัดในหน่วยของ lp/mm มีค่าการเปรียบเทียบการแยกเท่ากับ 100% เมื่อตรวจวัดผ่านระบบเชิงแสง พบว่า ภาพของวัตถุมีค่าการเปรียบเทียบการแยกลดลงและมีค่าเท่ากับ 90% โดยการวัดฟังก์ชันความเปรียบต่างของระบบจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าการแยกชัดในหน่วยของ lp/mm ที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการคำนวณหาค่าการเปรียบเทียบการแยกที่ลดลงจนกระทั่งระบบไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างเส้นขาวและดำ

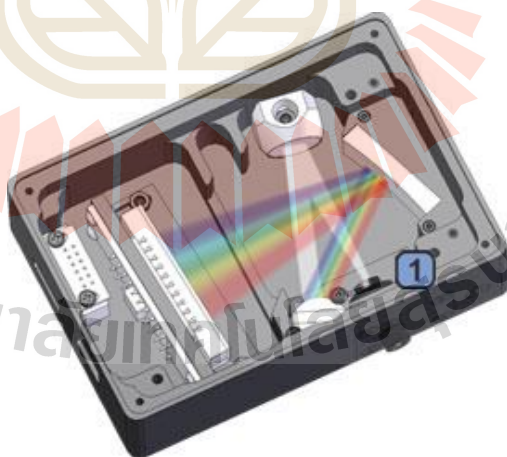


รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการแยกของภาพวัตถุและสัญญาณภาพการตรวจวัดด้วยระบบเชิงแสง  
(ที่มา : <https://edmundoptics.com/application-notes/imaging/mtf>, 2022)

## 2.4 ปรีทัศน์วรรณกรรม

ปรีทัศน์วรรณกรรมนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณค่าสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง ซึ่งเกี่ยวข้องกับเทคนิคในการตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดที่มีความกว้างของสเปกตรัมในระดับไมโครเมตร รวมถึงเทคนิคการตรวจจับวัดสัญญาณสเปกตรัมโดยใช้กล้องความร้อนไมโครโบลมิเตอร์ชนิดอาร์เรย์สำหรับการตรวจวัดสัญญาณ

เทคนิคการเก็บสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีย่านอินฟราเรดด้วยเกรตติงสเปกโตรมิเตอร์นั้นไม่สามารถกำหนดอุปกรณ์ภายในสเปกโตรมิเตอร์ให้มุมคงที่ได้ อาทิเช่นไม่สามารถกำหนดมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนและตัวตรวจจับให้อยู่กับที่โดยไม่มีการหมุนมุมไม่ได้ เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านอินฟราเรดเมื่อตกกระทบทำมุมกับเกรตติงเลี้ยวเบนแล้วสะท้อนออกมาในมุมประจำความยาวคลื่นที่มีความกว้างของสัญญาณสเปกตรัมกว้างมากกว่าพื้นที่ตรวจจับสัญญาณและไม่สามารถเก็บสัญญาณสเปกตรัมทั้งย่านคลื่นแสงอินฟราเรดได้ ซึ่งต่างจากการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมในย่านแสงที่สามารถมองเห็นได้ 400 ถึง 700 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ระบบสเปกโตรมิเตอร์ชนิดเกรตติงเลี้ยวเบนที่ใช้ในย่านแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Chimenti, 2013) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าแถบสเปกตรัมไม่กว้างเกินกว่าตัวตรวจจับสัญญาณ

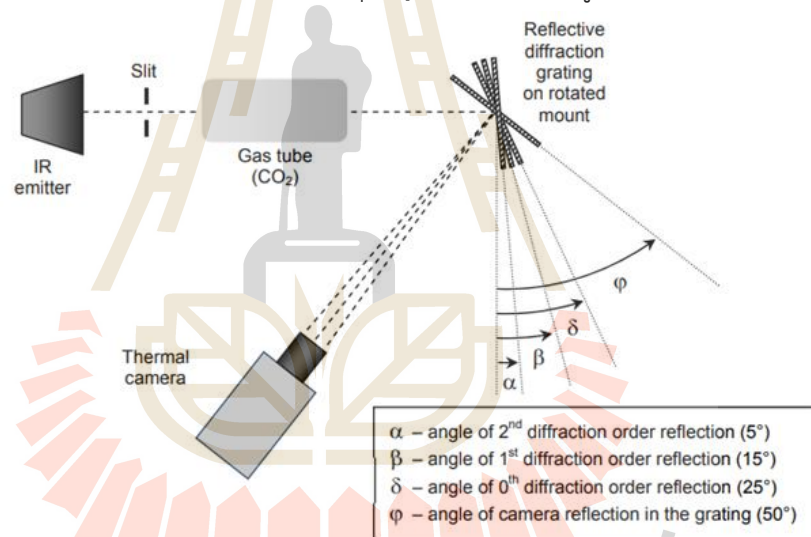


รูปที่ 2.18 ระบบสเปกโตรมิเตอร์ชนิดเกรตติงเลี้ยวเบนย่านแสงที่สามารถมองเห็นได้

(ที่มา : Chimenti, 2013)



ดังนั้นในการที่จะเก็บสัญญาณสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านอินฟราเรดจึงต้องมีการหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบน ซึ่งรูปแบบการหมุนจะมีตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่แน่นอนจะหมุนเพียงเกรตติงเลี้ยวเบนหรือตัวตรวจวัดสัญญาณเท่านั้นเพื่อลดความซับซ้อนในการใช้สมการเกรตติง (Mohazzabi et al., 2019) ดังสมการที่ 2.8 โดยการหมุนเกรตติงเพื่อเก็บสัญญาณสเปกตรัมคลื่นแสงย่านอินฟราเรดนั้น เมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดมีค่าคงที่ การหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนไปในทิศทางเข็มนาฬิกาไปด้วยมุมคงที่  $\alpha$  จะเป็นการเก็บสัญญาณสเปกตรัมที่อันดับคลื่นที่ 2 หมุนมุมที่กว้างขึ้นด้วยมุม  $\beta$  และ  $\delta$  จะเป็นการเก็บสัญญาณสเปกตรัมที่อันดับคลื่นที่ 1 และ 0 (มุมที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนจะเกิดแถบแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงทุกความยาวคลื่นรวมกัน) ตามลำดับ และการหมุนมุมที่กว้างด้วยมุม  $\varphi$  ซึ่งระนาบของเกรตติงเลี้ยวเบนตั้งฉากกับตัวตรวจวัด จึงทำให้เกิดสัญญาณภาพสะท้อนของตัวตรวจวัดสัญญาณเองจึงทำให้ไม่สามารถหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนมาเพื่อเก็บสัญญาณสเปกตรัมในมุม  $\varphi$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19

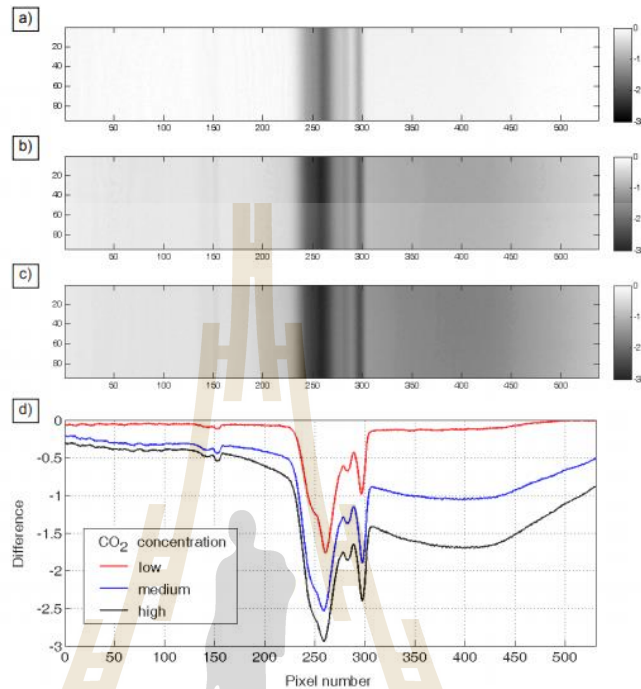


รูปที่ 2.19 การตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมด้วยการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบน

(ที่มา : Olbrycht et al., 2014)

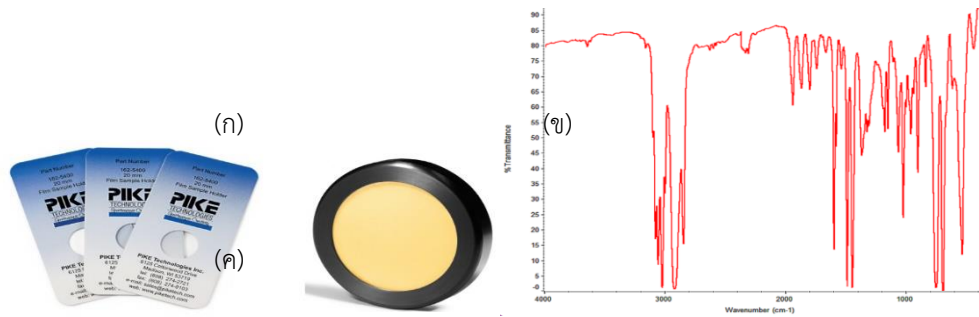
จากรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรด 3 ถึง 5 ไมโครเมตร ด้วยการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนในการตรวจวัดสัญญาณด้วยกล้องความร้อนเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่อยู่ในอากาศ (Olbrycht et al., 2014) โดยสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดกล้องความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของค่าสัญญาณมีค่าต่างกันเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้นทำให้ความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.20 (a) (b) และ (c) จากความเข้มข้นน้อยไปมากของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ เมื่อประมวลผลสัญญาณภาพจะได้ค่าสเปกตรัมของการตรวจวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 2.20 (d) ซึ่งมีการ

ดูดกลืนสัญญาณคลื่นแสงบริเวณฟิสิกเซลช่วง 250 ถึง 300 และเปลี่ยนค่าจำนวนฟิสิกเซลเป็นค่าความยาวคลื่นโดยสอบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิงการดูดกลืนแสงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



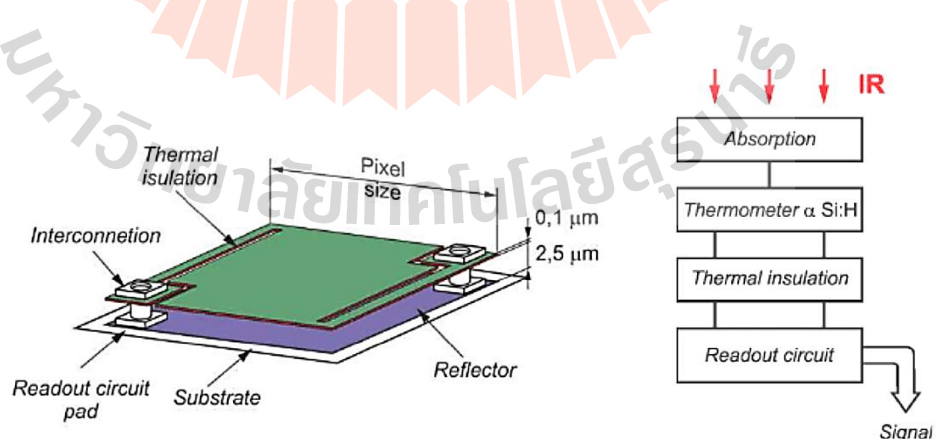
รูปที่ 2.20 รูปสัญญาณภาพสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (a) ความเข้มชั้นน้อย (b) ความเข้มชั้นกลาง (c) ความเข้มชั้นสูงและ (d) สัญญาณสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ที่มา : Olbrycht et al., 2014)

การเปลี่ยนค่าสัญญาณสเปกตรัมจากสัญญาณต่อฟิสิกเซลเป็นค่าสัญญาณต่อความยาวคลื่นต้องใช้ตัวอย่างมาตรฐานค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นในการตรวจสอบ (Mark and Workman, 2018) เพื่อความถูกต้องของความยาวคลื่นแสงที่มาจากกรแยกด้วยเกรตติงเลี้ยวเบนและตกกระทบตัวตรวจวัด โดยตัวอย่างมาตรฐานการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดนั้นจะใช้ตัวอย่างมาตรฐานพอลิสไตรีนตามมาตรฐานของ National Institute of Standards and Technology (NIST) ซึ่งมีทั้งชนิดการอ้างอิงด้วยสัญญาณสเปกตรัมของการส่องผ่าน (Transmittance Wavelength Standard) แสดงดังรูปที่ 2.21 (ก) การการสะท้อน (Reflectance Wavelength Standard) จากพื้นผิว แสดงดังรูปที่ 2.21 (ข) และสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของการส่องผ่านแผ่นมาตรฐานพอลิสไตรีนแสดงดังรูป 2.21 (ค)



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างมาตรฐานการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัม (ก) Transmittance Wavelength Standard (ข) Reflectance Wavelength Standard (PIKE Technologies, Inc.) และ (ค) %Transmittance of Polystyrene reference materials (NIST Standard)

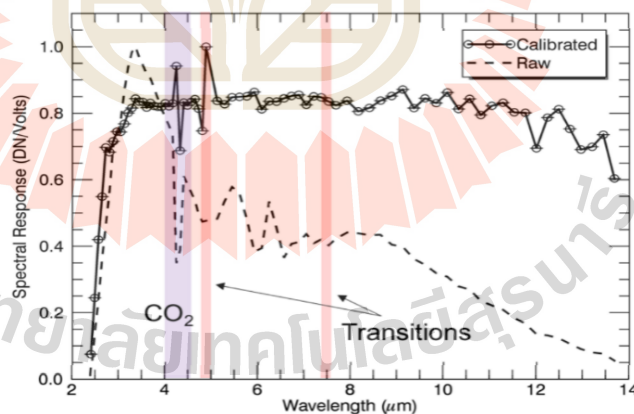
ตัวตรวจวัดสัญญาณย่านอินฟราเรดชนิดไมโครโบลอมิเตอร์แบบ 2D Focal Plane Array (FPA) เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณความร้อนของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ตกกระทบ โดยโครงสร้างของไมโครโบลอมิเตอร์แต่ละพิกเซลประกอบด้วย Absorbing surface, Thermal insulation, Reflector และ Readout integrated circuit (ROIC) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.22 เมื่อคลื่นแสงย่านอินฟราเรดผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ผ่านเลนส์โฟกัสสัญญาณคลื่นแสงตกกระทบในแต่ละพิกเซล คลื่นแสงจะถูกดูดซับพลังงานโดยชั้น Absorbing surface บน Thermal insulation และคลื่นแสงบางส่วนที่ส่องผ่าน Absorbing surface จะตกกระทบ Reflector ซึ่งเคลือบด้วยสะท้อนคลื่นแสง อาทิเช่น ไทเทเนียมและทอง เป็นต้น จากนั้นคลื่นแสงสะท้อนกลับเข้าสู่ Absorbing surface อีกครั้ง เพื่อเพิ่มสัญญาณของตัวตรวจวัด เมื่อชั้น Absorbing surface ดูดซับพลังงานคลื่นแสงย่านอินฟราเรด จะถูกแปลงค่าพลังงานเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วย ROIC



รูปที่ 2.22 โครงสร้างระดับพิกเซลของไมโครโบลอมิเตอร์

(ที่มา : Fissette et al., 2017)

ตัวตรวจวัดสัญญาณย่านอินฟราเรดเมื่อเทียบตัวตรวจวัด MCT (Mercury Cadmium Telluride) ที่เป็นตัวตรวจวัดแบบ Single point ซึ่งไมโครโบลมิเตอร์นั้นเป็นแบบ 2D FPA สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีระบบทำความเย็นและราคาต่ำกว่า MCT จึงทำให้ไมโครโบลมิเตอร์เป็นตัวเลือกที่สามารถนำมาใช้กับระบบสเปกโทรมิเตอร์ (Leijtens et al., 2017) โดยการใช้กล้องความร้อนประเภทไมโครโบลมิเตอร์ในงานทางสเปกตรสโคปี อาทิเช่นการใช้ INO Microxcam ซึ่งเป็นไมโครโบลมิเตอร์ชนิด Vanadium Oxide (VOx) และเป็น Uncooled Microbolometer ชนิด FPA 384x288 พิกเซล มีค่า ROIC 5.53 เมกาเฮิร์ตซ์ ณ อัตราเฟรม (Frame per second, FPS) 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 20 มิลลิวินาทีต่อเฟรม (Budzier et al., 2015; Fissette et al., 2017) มีขนาดพิกเซล (Pixel size) 35  $\mu\text{m}$  ที่มีค่า Spectral Response ประจำความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิคการนำโมโนโครมาเตอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่น 2-14 ไมโครเมตร โดยโมโนโครมาเตอร์มีค่าการแยกขีดสเปกตรัม 32 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 2 ถึง 5 ไมโครเมตร, 64 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 4 ถึง 9 ไมโครเมตร และ 96 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 7 ถึง 14 ไมโครเมตร เข้ามาใช้ในการตรวจวัดหาค่า Spectral Response (Honniball, 2017) และสามารถเก็บสัญญาณภาพประจำพิกเซลขนาด 16 bit (BudzierFast et al., 2010) นอกจากนี้การใช้งานตัวตรวจวัดที่เป็นอาเรียสำหรับงานทางสเปกโทสโคปีเชิงภาพ ระบบสามารถตรวจวัดสัญญาณสเปกโทสโคปีประจำตำแหน่งของตัวอย่างทดลองโดยสามารถสอบเทียบการแยกขีดเชิงตำแหน่งของระบบด้วยแผ่นมาตรฐาน 1951 USAF Resolution Target (Peter and Dieter, 2006)



รูปที่ 2.23 Spectral response of the INO microbolometer  
(ที่มา : Honniball, 2017)

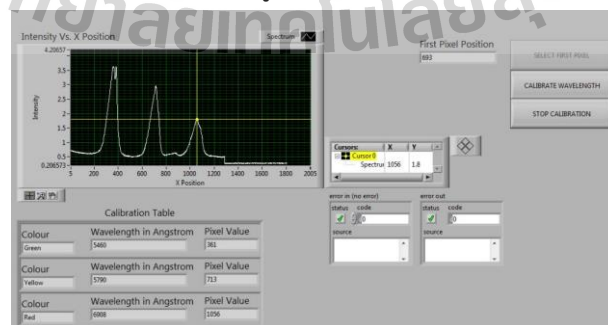
เมื่อตรวจวัดสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องความร้อนซึ่งบริเวณของพิกเซลที่ใช้ในการเก็บสัญญาณถูกรบกวนด้วยสัญญาณจากพิกเซลโดยรอบ การเพิ่มความคมชัดของสัญญาณตัวตรวจวัดกล้องความร้อนสามารถใช้การประมวลผลภาพความร้อน (Thermal image processing)

ด้วยวิธีการ Noise removal, Contrast enhancement, Edge sharpening และ Greyscale palette optimization (Dulski et al., 2010) โดยการหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) เพื่อหาค่าความแตกต่างระหว่างสำหรับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการประมวลผลของระบบและตัวตรวจวัดแบบไมโครโพลิมิเตอร์ (Usamentiaga et al., 2018; Deane et al., 2018) ด้วยสมการที่ 2.11

$$SNR = \frac{|\mu_S - \mu_N|}{\sigma_N} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\mu_S$  คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณการตรวจวัดจากตัวตรวจวัด  
 $\mu_N$  คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจวัด  
 $\sigma_N$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจวัด

การควบคุมและประมวลผลสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ทางทัศนศาสตร์มีการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อควบคุมและประมวลผลทางทัศนศาสตร์หลากหลายภาษาซึ่ง NI LabView เป็นหนึ่งในภาษาที่ถูกเลือกใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึม อาทิเช่น การสร้างอัลกอริทึมควบคุมมอเตอร์สำหรับงานทางเครื่องตรวจวัดเชิงแสง (Sánchez-Alvarez et al., 2018; Wang et al., 2015) การเก็บค่าสัญญาณสเปกตรัมของแสงขาวด้วยตัวตรวจวัด CCD (Charge coupled Device) รวมกับการใช้ภาษา NI LabView สร้าง Graphical User Interface (GUI) ในการสอบเทียบความถูกต้องของสเปกตรัม (Garg et al., 2009) แสดงดังรูปที่ 2.24 การเก็บสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมด้วยภาษา NI LabView (Marques et al., 2016) การควบคุมแหล่งกำเนิดแสง LED (Light emitting diode) เลเซอร์ไดโอดด้วยการควบคุมสัญญาณ Voltage-Current และ Power-Current ด้วย NI USB Data Acquisition (DAQ) แบบอัตโนมัติ (Garg et al., 2011) ซึ่งทำให้การกำหนดฟังก์ชันและแสดงผลการใช้งานได้เหมาะสมกับการใช้งานได้มากขึ้นและยังช่วยในการลดต้นทุนของโปรแกรมในการตรวจวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่มีราคาค่อนข้างสูง



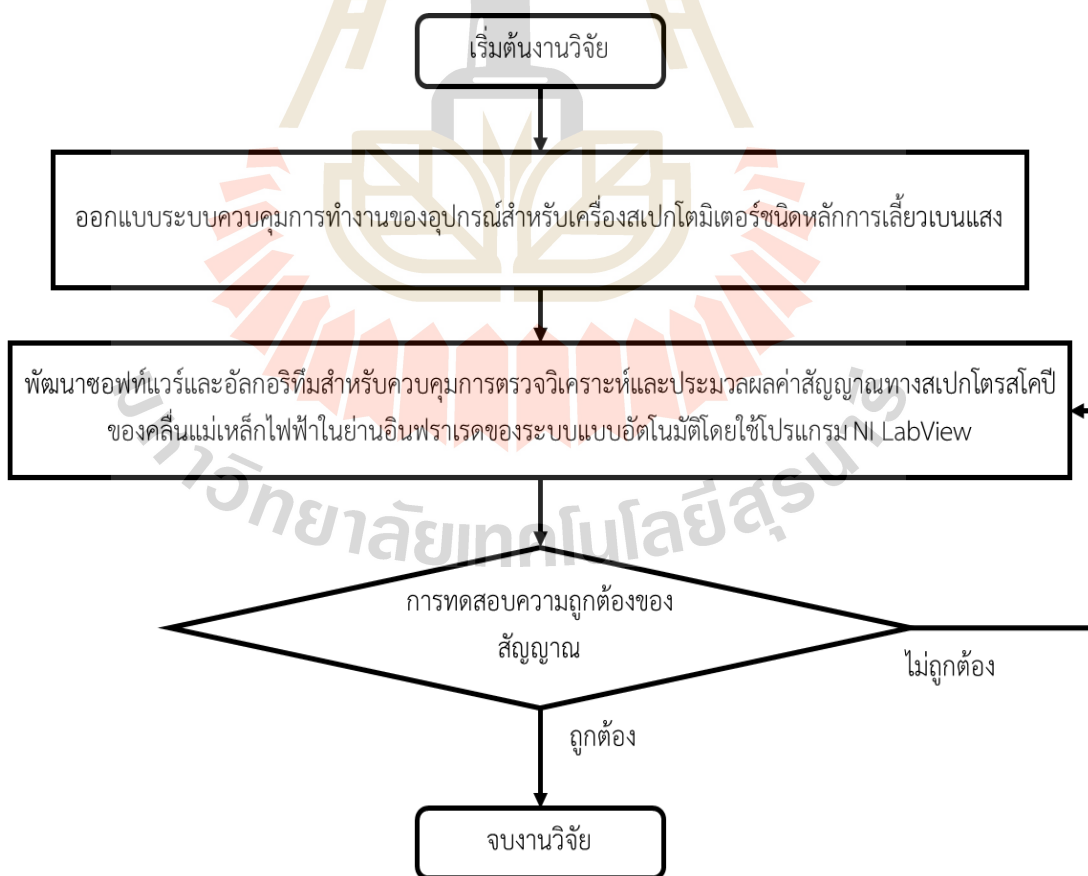
รูปที่ 2.24 Graphical User Interface (GUI) ในการสอบเทียบความถูกต้องของสเปกตรัม (ที่มา : Garg et al., 2011)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการวิจัยภายใต้งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ 1) ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง 2) พัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโตรสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView และ 3) การทดสอบความถูกต้องของสัญญาณ โดยความเชื่อมโยงของกระบวนการวิจัยถูกแสดงในรูปแบบที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดแต่ละหัวข้อแสดงถัดไป



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

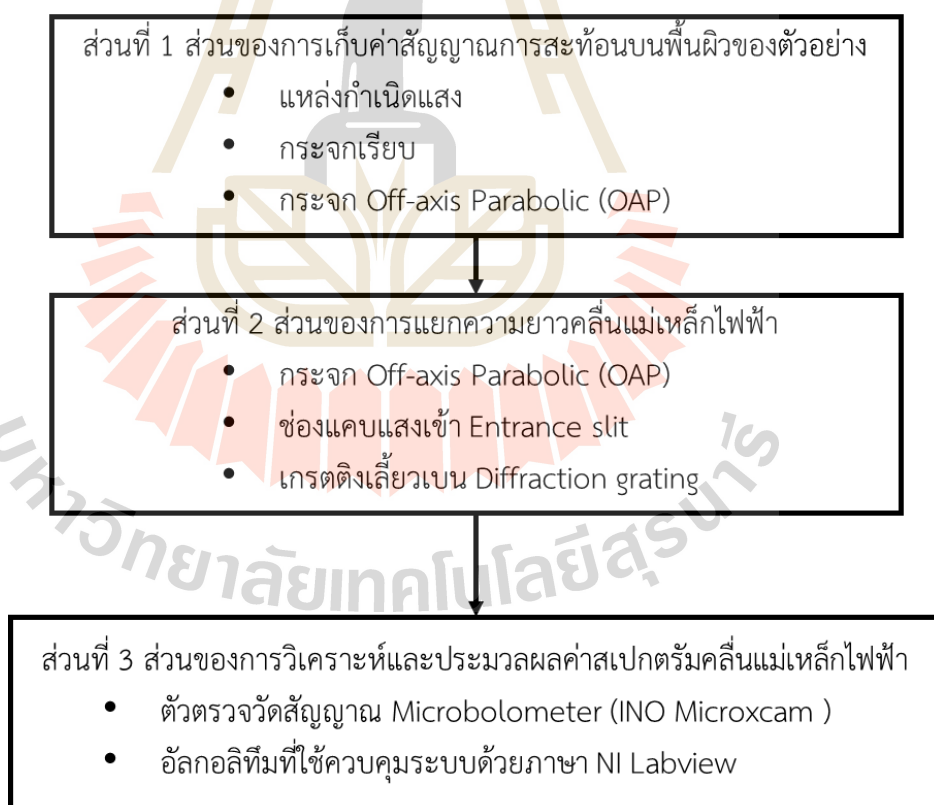


### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้และอินฟราเรดย่านกลางด้วยหลักการด้วยหลักการเลี้ยวเบน รายละเอียดพอสังเขปของวิธีวิจัยและพัฒนาเป็นดังต่อไปนี้

#### 3.2.1. ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง

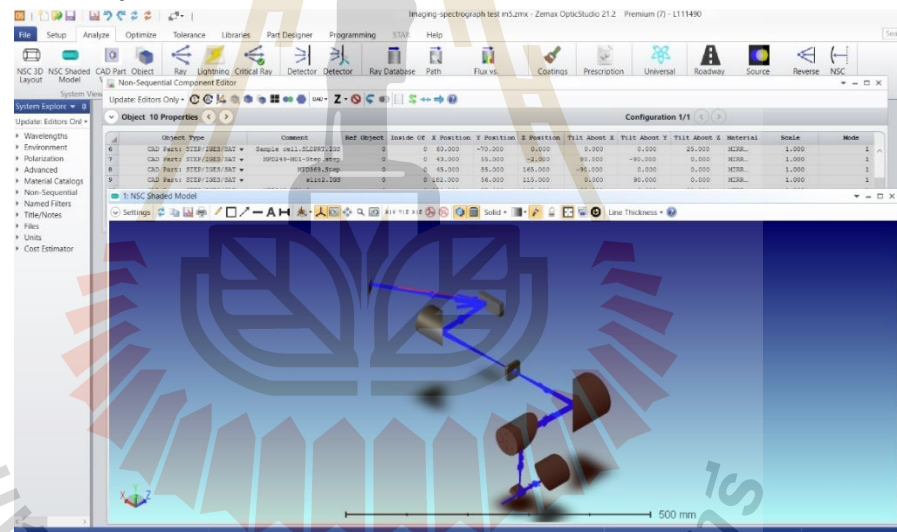
ระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก คือ 1) ส่วนของการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่าง 2) ส่วนของการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ 3) ส่วนของการวิเคราะห์และประมวลผลค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยหลักการ Czerny-Turner Spectrometer



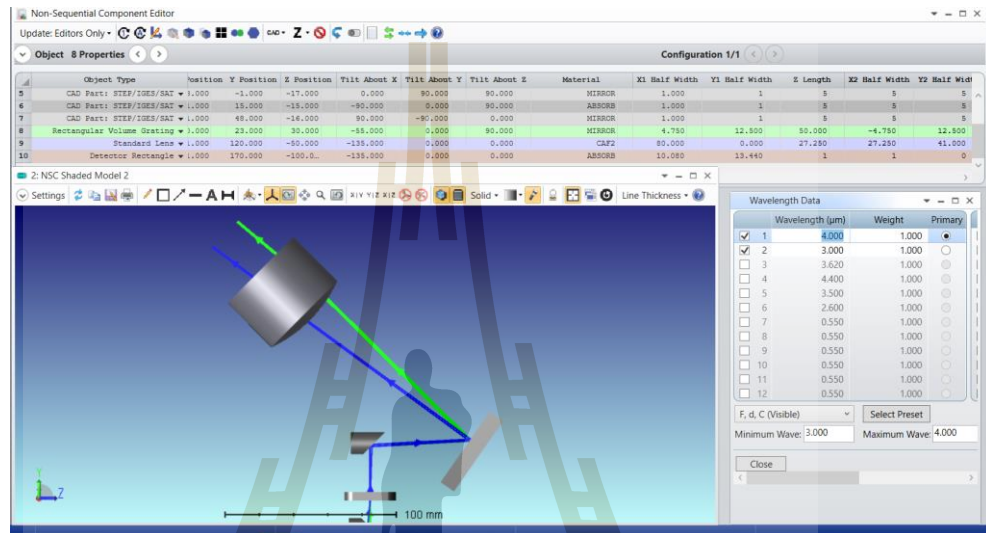
โดยส่วนที่ 1 ส่วนของการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่างประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง Global ที่มีค่าความยาวคลื่นแสงที่ไม่เป็นเอกรงค์ (Polychromatic radiation , 500-9000 นาโนเมตร) และกระจก Off-axis Parabolic (OAP) มุมสะท้อน 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 101.6 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.5 (ก) โดยกระจกผิว OAP ถูกเคลือบผิวด้วยทองซึ่งมีค่าการสะท้อนต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 20,000 นาโนเมตร เพื่อทำการโฟกัสแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง Global ลงบนตัวอย่างทดลอง เมื่อแสงกระทบ ตัวอย่างทดลองที่กำหนดให้เป็นกระจกเรียบผิวเคลือบอลูมิเนียมแสงที่จะสะท้อนจากตัวอย่างทดลองจะ ตกกระทบที่กระจก OAP มุมสะท้อน 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 101.6 มิลลิเมตร จากนั้นแสงจะถูกโฟกัสด้วยกระจก OAP มุมสะท้อน 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 152.4 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงเข้าสู่ส่วนที่ 2 ส่วนของการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.3



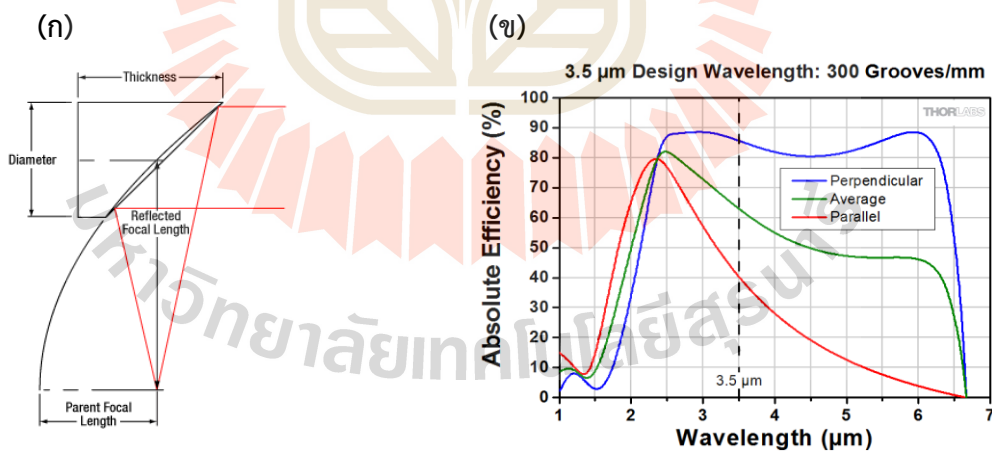
รูปที่ 3.3 ออกแบบระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio

เมื่อแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่างในส่วนที่ 1 เข้าสู่ส่วนที่ 2 ส่วนของการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยส่วนของการแยกความยาวคลื่นใช้หลักการของ Czerny-Turner Spectrometer แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบไปด้วยสลิตเดี่ยวปรับความกว้าง 20 ถึง 6000 ไมโครเมตร กระจก OAP มุมสะท้อน 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 152.4 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 3.5 (ก)และเกรตติงเลี้ยวเบน 300 Grooves/Millimeter ผิวเคลือบด้วยอลูมิเนียมซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการแยกความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.5 (ข) ในการแยกความยาวคลื่น

ย่านอินฟราเรดจากนั้นแสงที่ตกกระทบเกรตติงเลี้ยวเบนจะสะท้อนด้วยความยาวคลื่นต่างกันตามสมการที่ 2.8 สมการของเกรตติงเลี้ยวเบนตามมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ต่างกัน โดยสัญญาณการสะท้อนจากส่วนที่ 2 ส่วนของการแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ และในส่วนที่ 3 ส่วนของการวิเคราะห์และประมวลผลค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 การออกแบบส่วนของระบบแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยหลักการ Czerny-Turner Spectrometer ด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio

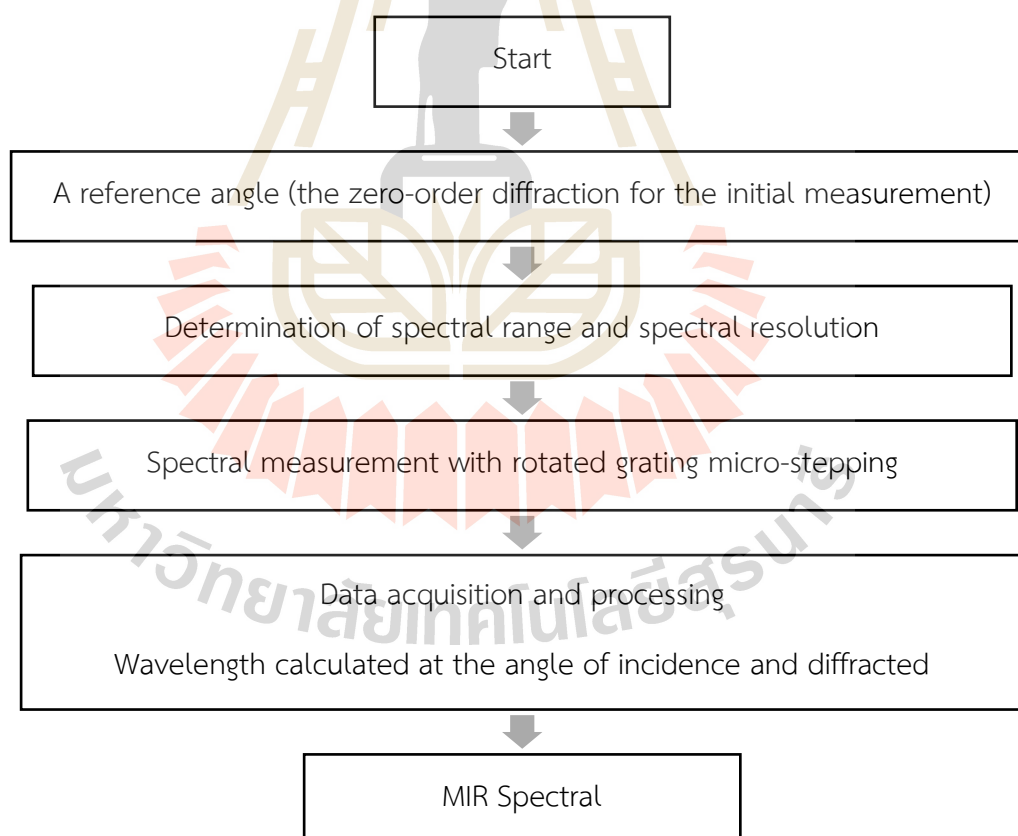


รูปที่ 3.5 (ก) เส้นทางเดินแสงและพิกัดขนาดของกระจก OAP (ข) Absolute Efficiency ของเกรตติงเลี้ยวเบนย่านอินฟราเรด 300 Grooves/mm

เมื่อคลื่นแสงแต่ละความยาวคลื่นที่สะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดไมโครโบลอไมเตอร์ INO Microxcam ชนิดอาร์เรย์ 384 x 288 พิกเซล ซึ่งสามารถตรวจวัดแสงที่มีความยาวคลื่น 2000 ถึง 14000 นาโนเมตร โดยค่าสัญญาณของสะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนจะถูกนำไปวิเคราะห์และประมวลผลด้วยอัลกอริทึมด้วยภาษา NI LabView

### 3.2.2 การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView

การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทาง สเปกโทรสโคปีของระบบการประมวลผลสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรดแบบอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรม NI LabView แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสร้างอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีของระบบ

เนื่องจากสัญญาณความยาวคลื่นย่านอินฟราเรดที่สะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนเป็นการเลี้ยวเบนของแสงที่มีมุมกว้างกว่าขนาดของเลนส์ (รุ่น INO Microxcam) ของไมโครโบลิมิเตอร์ชนิดอาร์เรย์ จึงทำให้การตรวจวัดสัญญาณต้องมีการหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อตรวจวัดสัญญาณคลื่นย่านอินฟราเรด ณ ความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นตามมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของคลื่นแสงที่ออกจากเกรตติงเลี้ยวเบนโดยใช้สมการเกรตติงเลี้ยวเบนในการคำนวณหาค่าความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่คลื่นอันดับ 1<sup>st</sup> 2<sup>nd</sup> และ 3<sup>rd</sup> order

Incident angle	Reflected angle	1 <sup>st</sup> - order	2 <sup>nd</sup> - order	3 <sup>rd</sup> - order
20	-20	0	0	0
15	-25	1.091	0.545	0.363
10	-30	2.175	1.087	0.725

การหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนโดยทำการติดตั้งเกรตติงเลี้ยวเบนบน Motorized rotating stage ที่มีอัตราทดของมอเตอร์ที่ 1/90 และ Step Angle 1.8 องศา/พัลส์ (Full step) ซึ่งจะควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์สำหรับการหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ Micro-stepper โดยคำนวณค่าจำนวนพัลส์ของสัญญาณพัลส์ด้วยสมการที่ 3.1 ซึ่งการควบคุมความเร็วในการหมุนด้วยการปรับค่าตัวแปรคาบเวลา (Duration time) ของสัญญาณพัลส์ โดยการหาคาบเวลาที่ขึ้นกับค่าความถี่ (Frequency) แสดงดังสมการที่ 3.2 และการควบคุมความละเอียดในการหมุนมุมด้วยการปรับค่า Step Size ของ Microstepp Driver ที่ขึ้นกับ Pulse/Revolution โดยการหาค่าตัวแปร Step Angle แสดงดังสมการที่ 3.3

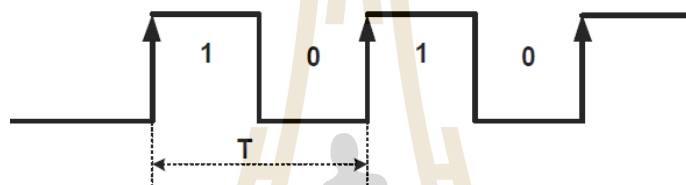
$$\text{Number of Pulse} = \frac{\text{Position Angle}}{\text{Step Angle} \times \text{Step Size}} \quad (3.1)$$

$$\text{Duration time} = \frac{\text{Number of pulse}}{\text{Frequency}} \quad (3.2)$$

$$\text{Step size} = \frac{360}{\text{Pulse/Revolution} \times 1.8} \quad (3.3)$$

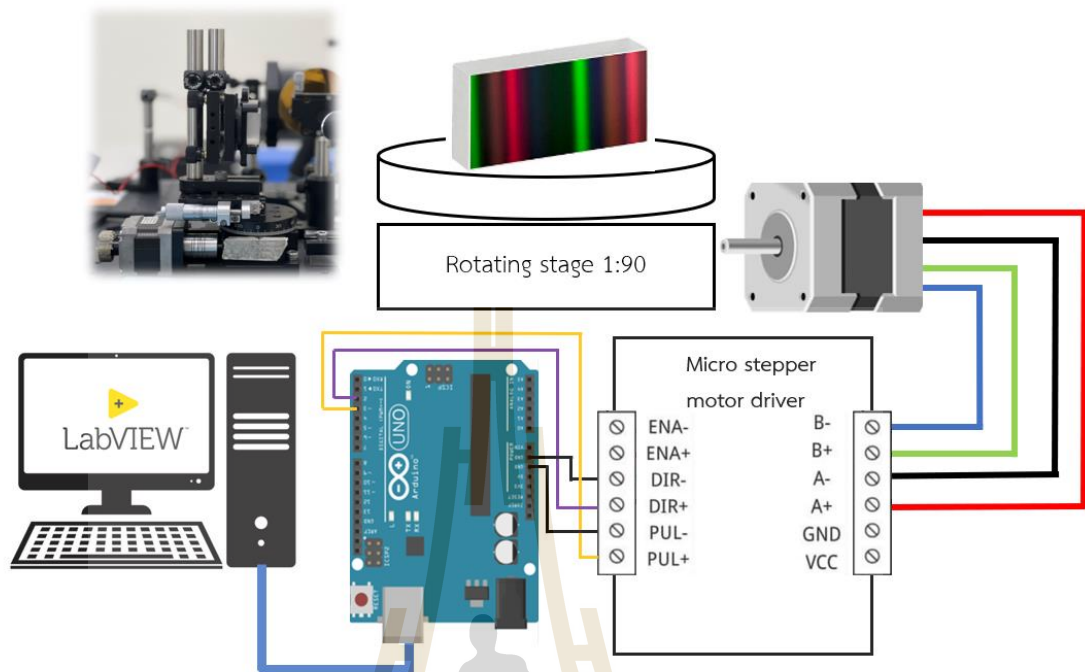
- เมื่อ **Number of Pulse** คือ จำนวนพัลส์ของสัญญาณพัลส์
- Position Angle** คือ ตำแหน่งมุมหมุนมอเตอร์ [องศา]
- Step Angle** คือ มุมการหมุนของสเตปมอเตอร์ใน 1 พัลส์ [ $1.8^\circ$  องศา/พัลส์]
- Step Size** คือ ความละเอียดของการหมุนในแต่ละพัลส์ [Full step=1]

จากสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นสมการในการคำนวณหาค่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุม Motorized rotating stage เพื่อควบคุมการหมุนมุมของเกaredตึงเลี้ยวเบน โดยค่าสัญญาณพัลส์ 1 พัลส์จะทำให้มอเตอร์หมุนไป 1 สเตปใน 1 คาบเวลา แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สัญญาณพัลส์ที่  $T=1$  คาบเวลาที่ทำให้สเตปมอเตอร์หมุนไป 1 สเตป

การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบและ Motorized rotating stage เพื่อควบคุมการหมุนของเกaredตึงเลี้ยวเบนโดยสัญญาณพัลส์ที่คำนวณจากอัลกอริทึมจะถูกส่งจากโปรแกรม Labview ด้วย LINX Digital write square wave ผ่านบอร์ด Arduino ส่งสัญญาณพัลส์บวก (Pulse +) ผ่าน Digital write pin และสัญญาณพัลส์ลบ (Pulse -) ผ่าน ground pin เข้าสู่ Microstepp Driver เพื่อส่งสัญญาณพัลส์ควบคุมค่าความละเอียดของมุมในการหมุนเกaredตึงเลี้ยวเบน และส่งสัญญาณจากโปรแกรม Labview ด้วย LINX Digital write ผ่านบอร์ด Arduino ส่งสัญญาณ Direction+ และ Drection- เข้าสู่ Microstepp Driver เพื่อกำหนดทิศทางการหมุนของเกaredตึงเลี้ยวเบนที่ติดตั้งบน Motorized rotating stage โดยลักษณะการเชื่อมต่อสายสัญญาณที่ตำแหน่งของ Pin ระหว่างบอร์ด Arduino และ Microstepp Driver แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การติดตั้ง motorized rotating stage และระบบควบคุมการหมุนด้วย Micro step driver

### 3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณ

การตรวจสอบสัญญาณค่าการสะท้อนบนพื้นผิวที่ตรวจวัดจากระบบที่สร้างขึ้น เพื่อความถูกต้องของสัญญาณการตรวจวัดจึงแบ่งการตรวจสอบความถูกต้องออกเป็น 1. การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ตกกระทบและสะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนในความยาวคลื่นที่มีค่าต่างกันในแต่ละมุมโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO และมาตรฐานพอลิสไตรีน 2. การตรวจสอบค่าการแยกตำแหน่งเชิงเส้นของระบบ และ 3. การตรวจสอบค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณการสะท้อนพื้นผิวกับค่าสัญญาณรบกวนของระบบ โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

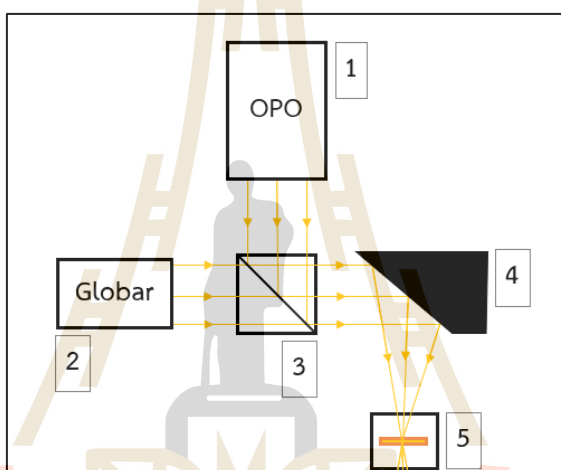
#### 3.3.1 การทดสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นด้วย

##### แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO

แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงย่านอินฟราเรดที่สามารถกำหนดค่าของความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแสงได้ละเอียดระดับ 1 นาโนเมตร ถูก



ออกแบบให้ติดตั้งในส่วนที่ 1 ส่วนของการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่างของระบบ (หัวข้อ 3.2.1) แสดงดังรูปที่ 3.9 ตำแหน่งของการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO ที่หมายเลข 1 โดยเส้นทางเดินแสงจากแหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO จะทำมุม 45 องศา กับ beam splitter (BSW511, Thorlabs) หมายเลข 3 เพื่อสะท้อนแสงเข้าสู่กระจก OAP หมายเลข 4 และแสงจะถูกโฟกัสเข้าสู่ส่วนของการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนของตัวอย่างทดลอง หมายเลข 5 ซึ่งตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง Global แสดงดังหมายเลข 2 โดยเส้นทางเดินแสงส่องผ่าน beam splitter เข้าสู่กระจก OAP หมายเลข 4

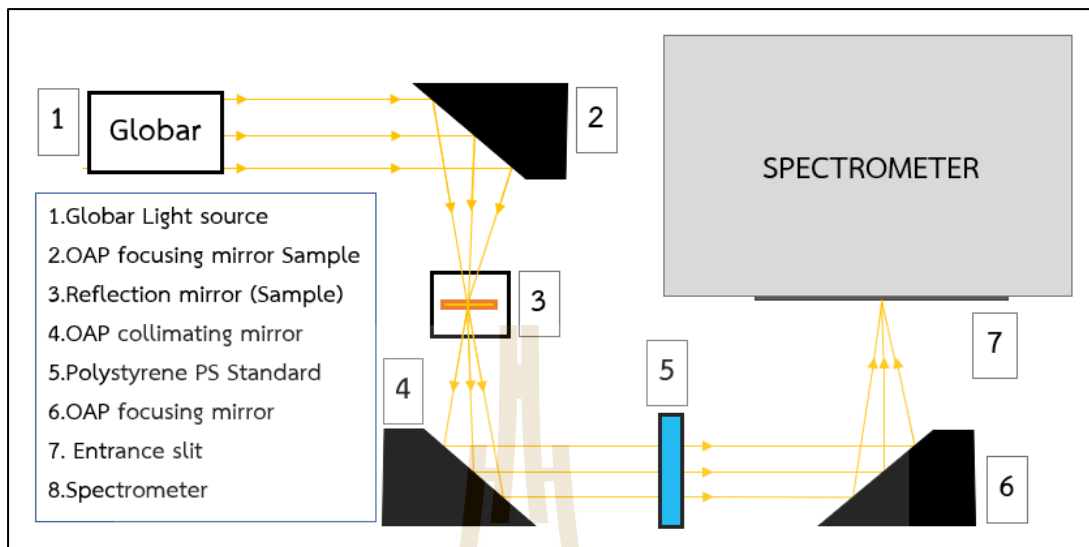


รูปที่ 3.9 การออกแบบระบบทดสอบความถูกต้องของความยาวคลื่นด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO

### 3.3.2 การทดสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นด้วยมาตรฐานพอลิสไตรีน

การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณสเปกตรัมโดยใช้มาตรฐานพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ซึ่งเป็นมีค่ามาตรฐานการส่องผ่านของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นสำหรับย่านอินฟราเรด โดยการตรวจสอบความถูกต้องของระบบด้วยมาตรฐานพอลิสไตรีนใช้กระจกอลูมิเนียมในส่วนของการสะท้อนพื้นผิวของแหล่งกำเนิดแสง Global โดยตำแหน่งของแผ่นมาตรฐานพอลิสไตรีนถูกติดตั้งระหว่างจากส่วนที่ 1 ส่วนของการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่างของระบบและส่วนที่ 2 ส่วนของการแยกสเปกตรัมความยาวคลื่น ซึ่งเส้นทางเดินแสงที่จะสะท้อนจากส่วนที่ 1 จะส่องผ่านแผ่นมาตรฐานพอลิสไตรีนก่อนผ่านเข้าสู่ช่องเปิดของสเปกโทมิเตอร์ แสดงดังรูปที่





รูปที่ 3.10 การออกแบบระบบทดสอบความถูกต้องของความยาวคลื่นด้วยมาตรฐานพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

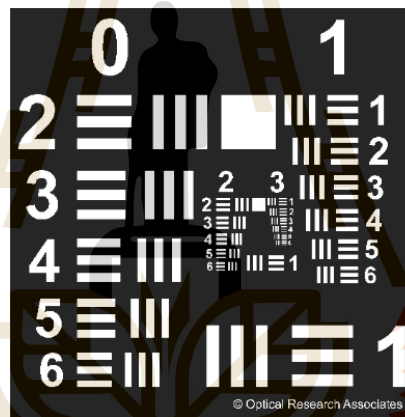
### 3.3.3 การทดสอบการแยกขีดเชิงตำแหน่ง (Spatial resolution) ของระบบ

การทดสอบการแยกขีดเชิงตำแหน่งของสัญญาณค่าการสะท้อนพื้นผิวของระบบซึ่งผ่านช่องเปิดแสงเข้าของสเปกโตรมิเตอร์จึงทำให้การประมวลผลค่าสัญญาณที่ตกกระทบตัวตรวจวัดไมโครโพลีเมเตอร์ชนิดอาร์เรย์สามารถตรวจวัดสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นได้ในแนวพิกเซลอาร์เรย์ในแนวแกน X และสามารถตรวจวัดการแยกขีดเชิงตำแหน่งของสัญญาณได้ในแนวพิกเซลอาร์เรย์ในแนวแกน Y ซึ่งสามารถตรวจวัดการแยกขีดเชิงตำแหน่งแบบเชิงเส้นโดยใช้แผ่นมาตรฐาน 1951 USAF Resolution Target แสดงดังรูปที่ 3.11 1951 USAF Resolution Target จะแบ่งออกเป็น Group โดยแต่ละ Group จะประกอบด้วย 6 Elements ซึ่งมีค่าความถี่เชิงตำแหน่ง (Spatial Frequency) ในหน่วยของ line-pairs per millimeter (lp/mm) แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยสามารถหาค่าการแยกขีดเชิงตำแหน่งด้วยสมการที่ 3.3

$$\text{Spatial resolution} = \frac{1}{2 \times (\text{Group, Element})} \times 10^3 \quad [\mu\text{m}] \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าค่าความถี่เชิงตำแหน่ง (Spatial Frequency) ของ Group และ Element สำหรับแผ่นมาตรฐาน 1951 USAF Resolution Target

Element /Group	-2	-1	0	1	2
1	0.250	0.500	1.000	2.000	4.000
2	0.280	0.561	1.120	2.240	4.490
3	0.315	0.630	1.260	2.520	5.040
4	0.353	0.707	1.410	2.830	5.660
5	0.397	0.793	1.590	3.170	6.350
6	0.445	0.891	1.780	3.560	7.130



รูปที่ 3.11 1951 USAF Resolution Target Group 1 ถึง 3 และ Element 1 ถึง 6

(ที่มา : <https://edmundoptics.com/application-notes/imaging/mtf>, 2022

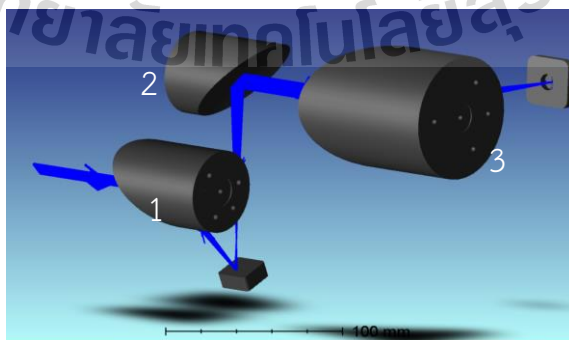
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการออกแบบเส้นทางการลำเลียงแสงสำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิด

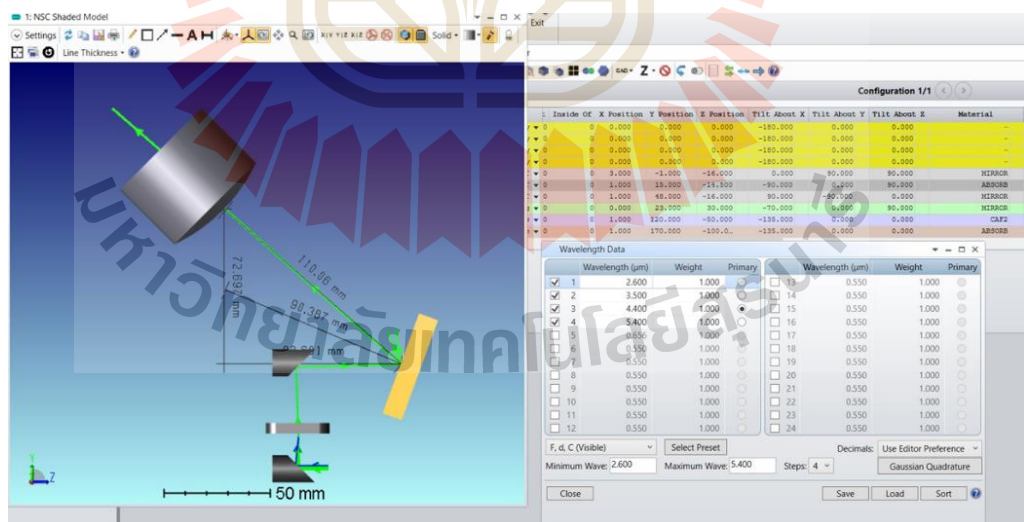
##### หลักการเลี้ยวเบนที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์

ผลการออกแบบเส้นทางการลำเลียงแสงของระบบด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนของ การเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่าง และส่วนของ การแยกความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยส่วนของ การเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่าง กำหนดตำแหน่งของกระจก OAP หมายเลข 1 มุมสะท้อน 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ระยะโฟกัส 101.6 มิลลิเมตร ใช้ในการโฟกัสคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสง Global เพื่อลำเลียงคลื่นแสงตกกระทบบนตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ซึ่งมีระยะห่างจากตัวอย่างเท่ากับ ระยะโฟกัสของ OAP คือ 101.6 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความเข้มสัญญาณสูงสุดและทำมุมเอียง 45 องศา เพื่อให้คลื่นแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างตกกระทบบนกระจก OAP หมายเลข 2 เก็บสัญญาณการสะท้อนของตัวอย่างวิเคราะห์ซึ่งกำหนดระยะห่างจากตัวอย่างเท่ากับระยะโฟกัสของ OAP คือ 101.6 มิลลิเมตร จากนั้นคลื่นแสงจะถูกลำเลียงเข้าสู่กระจก OAP หมายเลข 3 ซึ่งมีระยะห่างจากกระจก OAP หมายเลข 2 เท่ากับระยะโฟกัสของ OAP หมายเลข 2 เพื่อให้คลื่นแสงที่สะท้อนจากกระจก OAP หมายเลข 2 เป็นคลื่นแสงขนานตกกระทบบนกระจก OAP หมายเลข 3 และโฟกัสเข้าสู่ส่วนของ การแยกความยาวคลื่น แสดงดังรูปที่ 4.1

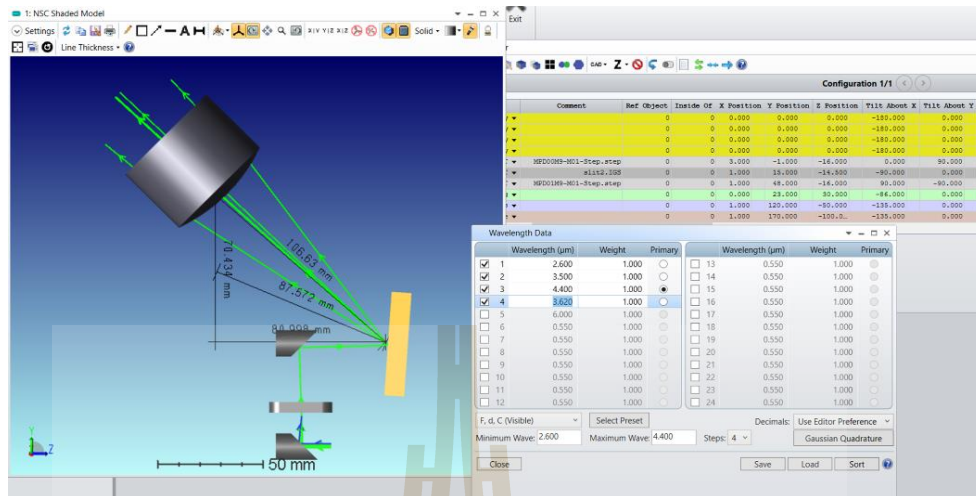


รูปที่ 4.1 ระบบการเก็บค่าสัญญาณการสะท้อนบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio

ผลการออกแบบระบบส่วนของการแยกความยาวคลื่น วิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหามุมประจำความยาวคลื่นที่สะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบน 300 grooves/millimeter ด้วยการกำหนดมุมของการสะท้อนที่อันดับคลื่นที่ศูนย์ซึ่งเป็นการสะท้อนของทุกความยาวคลื่น มีค่ามุมตกกระทบและสะท้อนจากเกรตติงเลี้ยวเบนด้วยมุมที่ทำกับเส้นปกติของเกรตติงเลี้ยวเบนเท่ากัน คือมุม 20 องศา ระยะทางจากช่องแคบแสงเข้าถึงกระจก OAP เป็นระยะทางเท่ากับระยะโฟกัสของกระจก OAP ระยะทางจากกระจก OAP ที่ทำให้เกิดคลื่นแสงขนานตกกระทบเกรตติงเลี้ยวเบน 82 มิลลิเมตร และระยะทางจากเกรตติงเลี้ยวเบนถึงตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครโวลมิเตอร์ 110 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อได้ตำแหน่งของมุมสะท้อนอันดับคลื่นที่ศูนย์จากนั้นใช้การหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อหามุมประจำความยาวคลื่นเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 โดยการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนด้วยมุม 16 องศาจากตำแหน่งมุมเกรตติงเลี้ยวเบนที่สะท้อนในอันดับคลื่นที่ศูนย์ จึงทำให้มุมตกกระทบเท่ากับ 4 องศาและมุมระหว่างเกรตติงกับตัวตรวจวัดสัญญาณไมโครโวลมิเตอร์เท่ากับ 36 องศา ซึ่งกำหนดความยาวคลื่นเลี้ยวเบนเท่ากับ 2.6, 3.5, 3.62 และ 4.4 ไมโครเมตร พบว่ามุมประจำความยาวคลื่นของ 2.6 ไมโครเมตรอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายสุดและมุมถัดมาคือ 3.5, 3.62 และ 4.4 ไมโครเมตร ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีค่ามุมสอดคล้องกับสมการเกรตติง (สมการที่ 2.8) โดยการสร้างระบบกล่าวในหัวข้อ 4.2



รูปที่ 4.2 การกำหนดมุมของการสะท้อนที่อันดับคลื่นที่ศูนย์ด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio



รูปที่ 4.3 การกำหนดมุมของการสะท้อนที่อันดับคลื่นที่ 1 ด้วยโปรแกรม Zemax Optical studio

## 4.2 ผลการสร้างระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

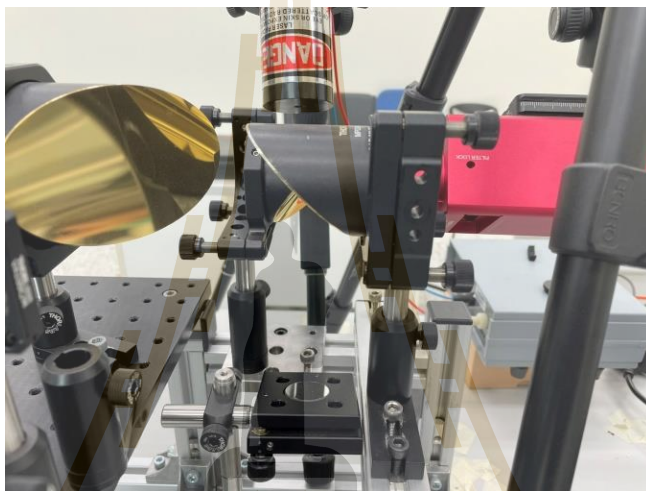
จากผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Zemax Optical studio ในหัวข้อ 4.1 ได้ทำการสร้างระบบจริงด้วยระยะที่ได้จากโปรแกรม Zemax Optical studio เพื่อตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการเก็บสัญญาณสะท้อนจากตัวอย่าง ส่วนของการแยกความยาวคลื่นและส่วนของการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การสร้างระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ส่วนที่ 1 ส่วนของเก็บสัญญาณการสะท้อนจากตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.5 ใช้กระจก OAP เคลือบด้วยทองแล้วใช้ตัวอย่างเป็นกระจกเรียบเคลือบอลูมิเนียมเพื่อเก็บสัญญาณค่าการสะท้อนของแหล่งกำเนิดแสง Global จากนั้นจะสะท้อนเข้าไปในส่วนที่ 2 ส่วนของการแยกความยาวคลื่นที่ประกอบไปด้วยช่องแคบแสงเข้า กระจก OAP เกรตติงเลี้ยวเบนที่ติดตั้งบน Motorized rotating stage และตัวตรวจวัด สัญญาณไมโครโพลีเมเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นในส่วนที่ 3 แสดงในหัวข้อที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ส่วนของเก็บสัญญาณการสะท้อนจากตัวอย่าง



รูปที่ 4.6 ส่วนของการแยกความยาวคลื่น

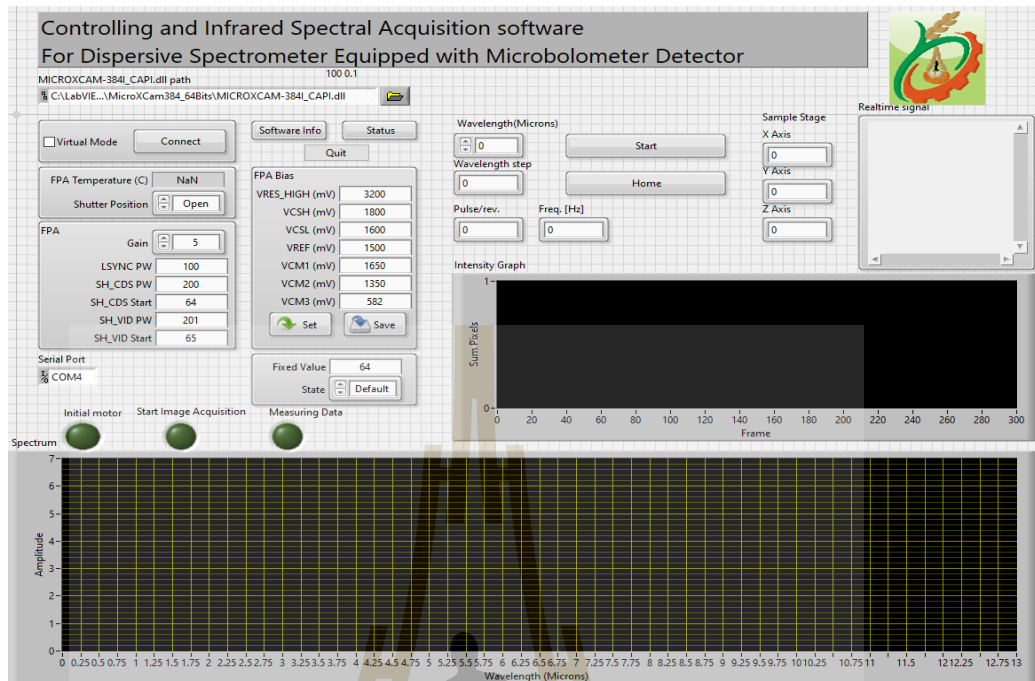
### 4.3 ผลการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView

การสร้างอัลกอริทึมของระบบโดยใช้โปรแกรม NI LabView ในรูปแบบลำดับ (Sequence) และคำสั่งวนซ้ำแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยรายละเอียดการทำงานของอัลกอริทึมในรูปแบบของลำดับแสดงดังหัวข้อถัดไป โดย Graphical User Interface (GUI) สำหรับใช้งานและควบคุมระบบตรวจวิเคราะห์โดย Front Panel ของโปรแกรม NI LabView แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าตัวแปรสำหรับควบคุมระบบ อาทิเช่น ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมและสำหรับตัวอย่างส่วนของ Block Diagram ของโปรแกรม NI LabView แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.7 อัลกอริทึมสำหรับควบคุมการตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโคปีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดของระบบแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม NI LabView

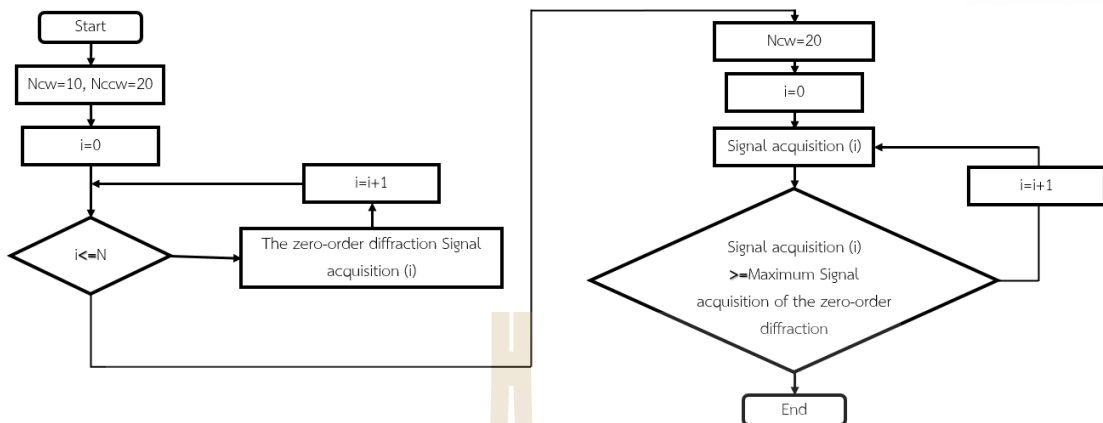




รูปที่ 4.8 Graphic User Interface สำหรับระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด

#### 4.3.1 อัลกอริทึมสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งมุมอ้างอิงของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์

อัลกอริทึมสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งมุมอ้างอิงของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ (The zero-order diffraction) สำหรับระบบการตรวจวิเคราะห์สเปกตรัมประจำความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนจำเป็นต้องทราบค่าของมุมอ้างอิงสำหรับเริ่มต้นมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อตรวจวัดสัญญาณสัญญาณการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง โดยอัลกอริทึมถูกแสดงดังรูปที่ 4.9 ด้วยการใช้คำสั่งวนซ้ำการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา เท่ากับ  $N_{cw}$  และ  $N_{ccw}$  ครั้ง ตามลำดับ เพื่อตรวจวัดตำแหน่งของสัญญาณการเลี้ยวเบนอันดับศูนย์ จากนั้นใช้คำสั่งวนซ้ำเพื่อหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนไปยังตำแหน่งของมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนที่มีค่าสัญญาณการตรวจวัดของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ซึ่งมีค่าสัญญาณการตรวจวัดสูงสุด



รูปที่ 4.9 อัลกอริทึมสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งมุมอ้างอิงของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์

#### 4.3.2 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น

การสร้างอัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยลำดับของการตรวจวิเคราะห์สัญญาณประจำมุมหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน 1 มุมควบคู่กับการคำนวณค่าความยาวคลื่นประจำมุมหมุนเกรตติงเลี้ยวเบน 1 ความยาวคลื่น โดยการกำหนดค่าตัวแปรการแยกขีดของสเปกตรัม (spectral resolution) และช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Spectral range) ในหน่วยของนาโนเมตรสำหรับการตรวจวิเคราะห์โดยผู้ใช้งาน จากนั้นอัลกอริทึมสำหรับคำนวณค่ามุมของการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบน (องศา) บนพื้นฐานของสมการเกรตติงเลี้ยวเบน ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ด้วยการหาผลต่างของสมการเกรตติงเลี้ยวเบนของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ ( $n=0$ ,  $\lambda_0$ ,  $\alpha_0$  และ  $\beta_0$ ) และการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่งหรือมากกว่า (The  $n$ -order diffraction,  $\lambda_n$ ,  $\alpha_n$  และ  $\beta_n$ ) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$n\lambda_n = d(\sin \alpha_n + \sin \beta_n) - d(\sin \alpha_0 + \sin \beta_0) \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 สำหรับการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง ( $n=1$ ) และคุณสมบัติทางตรีโกณของผลต่าง Sine แสดงดังสมการที่ 4.2

$$\frac{\lambda_1}{d} = 2 \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}\right) + 2 \cos\left(\frac{\beta_1 + \beta_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\beta_1 - \beta_0}{2}\right) \quad (4.2)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์และอันดับที่หนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของการเลี้ยวเบนเมื่อมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนมีค่าคงที่เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ โดยความสัมพันธ์ของมุดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4

$$\alpha_1 - \beta_1 = \alpha_0 - \beta_0 \quad (4.3)$$

$$A = \alpha_1 - \alpha_0 = \beta_1 - \beta_0 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.2 ความสัมพันธ์สมการที่ 4.4 และคุณสมบัติทางตรีโกณของผลรวมค่ามุมของ Cosine แสดงดังสมการที่ 4.5

$$\lambda_1 = 2d \sin\left(\frac{A}{2}\right) \left[ \cos\left(\frac{A+2\alpha_0}{2}\right) + \cos\left(\frac{A+2\beta_0}{2}\right) \right] \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 และคุณสมบัติทางตรีโกณของผลรวมค่ามุมของ Cosine แสดงดังสมการที่ 4.6 และจากความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ ( $\beta_0 = -\alpha_0$ ) และคุณสมบัติทางตรีโกณของค่ามุมของ Sine และ Cosine แสดงดังสมการที่ 4.7

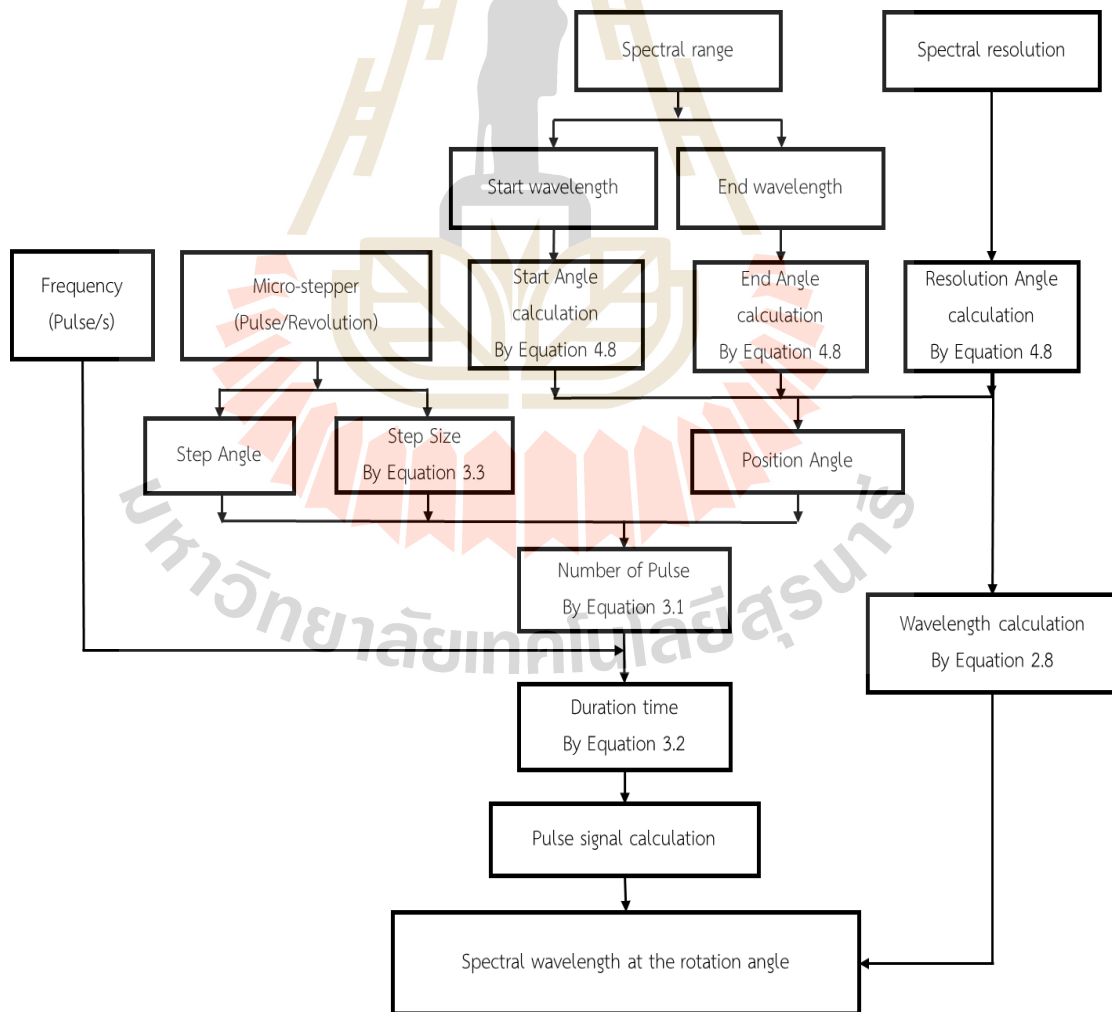
$$\lambda_1 = 2d \sin\left(\frac{A}{2}\right) \left[ \cos\left(\frac{A}{2}\right) (\cos \alpha_0 + \cos \beta_0) - \sin\left(\frac{A}{2}\right) (\sin \alpha_0 + \sin \beta_0) \right] \quad (4.6)$$

$$\lambda_1 = 2d \sin\left(\frac{A}{2}\right) \cos\left(\frac{A}{2}\right) (2\cos \alpha_0) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.4, 4.7 และคุณสมบัติทางตรีโกณของผลคูณของ Sine และ Cosine ซึ่งมีค่ามุมเท่ากัน แสดงดังสมการที่ 4.8

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_1}{2d \cos \alpha_0}\right) \quad (4.8)$$

การทำงานของอัลกอริทึมเมื่อกำหนดค่าตัวแปรการแยกขีดของสเปกตรัมและช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมในหน่วยของนาโนเมตร ค่าตัวแปร Start wavelength, End wavelength และ Resolution angle คำนวณด้วยสมการที่ 4.8 และการคำนวณสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน 1 มุม แสดงในสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 โดยค่าตัวแปรการแยกขีดของสเปกตรัมและสำหรับควบคุมจำนวนครั้งของมุมการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนโดยค่าตัวแปรช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัม ซึ่งตัวอย่างผลการคำนวณสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน 1 องศา แสดงดังตารางที่ 4.1 ประกอบด้วยค่า Position angle (Grating), Position angle (Motor), Number of Pulse, Step size, Step angle และ Duration time ของสัญญาณพัลส์ นอกจากนี้ค่าตัวแปร Resolution angle ของการหมุนมอเตอร์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์จะถูกกำหนดให้เป็นค่าที่นิยมไม่เกิน 1 ตำแหน่ง เพื่อลดความคาดเคลื่อนของตำแหน่งมุมหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นค่า Resolution angle จึงถูกส่งกลับไปให้อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณค่าความยาวคลื่นประจำมุมหมุนเพื่อคำนวณความยาวคลื่นประจำมุมหมุนจริงของเกรตติงเลี้ยวเบนด้วยสมการที่ 2.8



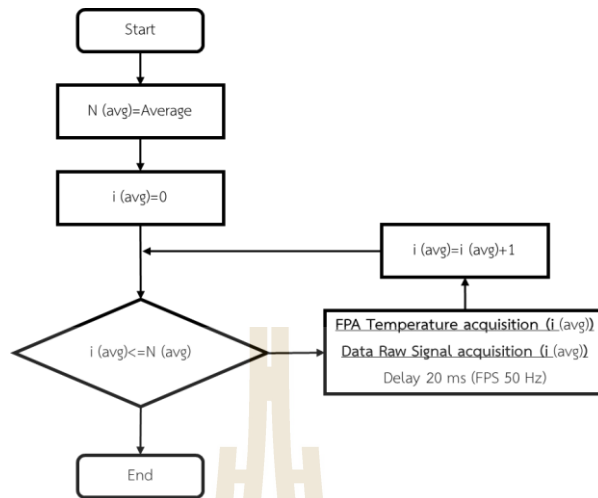
รูปที่ 4.10 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าตัวแปรที่ได้จากอัลกอริทึมสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น

Parameter	Value	Unit
Position angle (Grating)	0.1	degree
Position angle (Motor)	9	degree
Pulse/rev	400	Pulse/rev
Step size	0.5	
Step angle	1.8	degree/step
Number of Pulse	10	pulse
Frequency	200	pulse/s
Duration time	50	ms

#### 4.3.3 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดไมโครโพลมิเตอร์

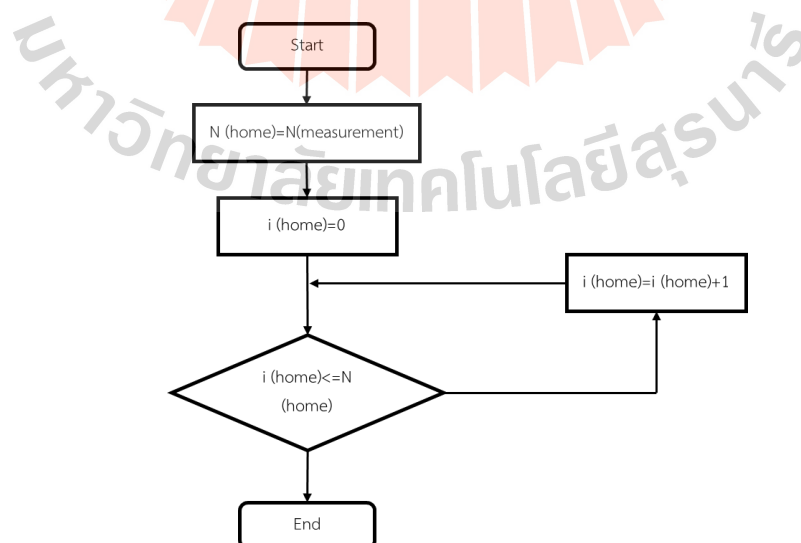
การตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมและอุณหภูมิของตัวตรวจวัดไมโครโพลมิเตอร์ประจำตำแหน่งมุมหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบน แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยการตรวจวัดสัญญาณเฉลี่ยประจำมุมมีจำนวนครั้งของการเฉลี่ย เท่ากับ  $N$  (avg) ซึ่งเป็นสัญญาณประจำเฟรมภาพของตัวตรวจวัดไมโครโพลมิเตอร์มีค่าการหน่วงเวลา (delay) มากกว่าหรือต่ำสุดไม่เกิน 20 มิลลิวินาทีด้วยการใช้คำสั่งวนซ้ำเมื่อสิ้นสุดคำสั่งวนซ้ำสำหรับอัลกอริทึมหัวข้อ 4.3.3 ลำดับของโปรแกรมดำเนินการอัลกอริทึมที่ 4.3.2 อีกครั้งเพื่อมุมหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบนสำหรับตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมและอุณหภูมิประจำมุมหมุนของเกรตติงเลี้ยวเบนในมุมหมุนถัดไป



รูปที่ 4.11 อัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดไมโครโพลิมิเตอร์ประจำตำแหน่งมุมหมุนของเกเรตติงเลี้ยวเบน

#### 4.3.4 อัลกอริทึมสำหรับเตรียมตรวจวัดสัญญาณ

เมื่อตรวจวิเคราะห์สัญญาณเสร็จสมบูรณ์สำหรับช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่กำหนด อัลกอริทึมจะทำการหมุนมุมของเกเรตติงเลี้ยวเบนกลับสู่ตำแหน่งอ้างอิงการเลี้ยวเบนอันดับศูนย์เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการตรวจวิเคราะห์สัญญาณครั้งถัดไป แสดงดังรูปที่ 4.12 แสดงคำสั่งวนซ้ำโดยค่าของตัวแปร  $N$  (home) จำนวนครั้งของการหมุนมุมเกเรตติงเลี้ยวเบนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $N$  (measurement) หรือค่าจำนวนครั้งของการหมุนมุมทั้งหมดของเกเรตติงเลี้ยวเบนสำหรับการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัม

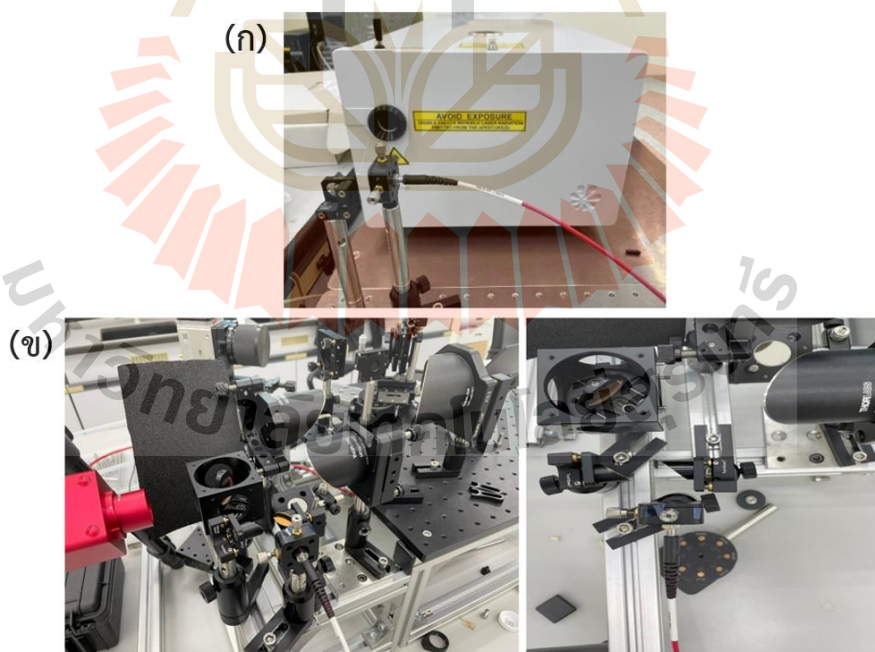


รูปที่ 4.12 อัลกอริทึมสำหรับเตรียมตรวจวัดสัญญาณ

#### 4.4 ผลของประสิทธิภาพเชิงแสงของระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์

##### 4.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง OPO

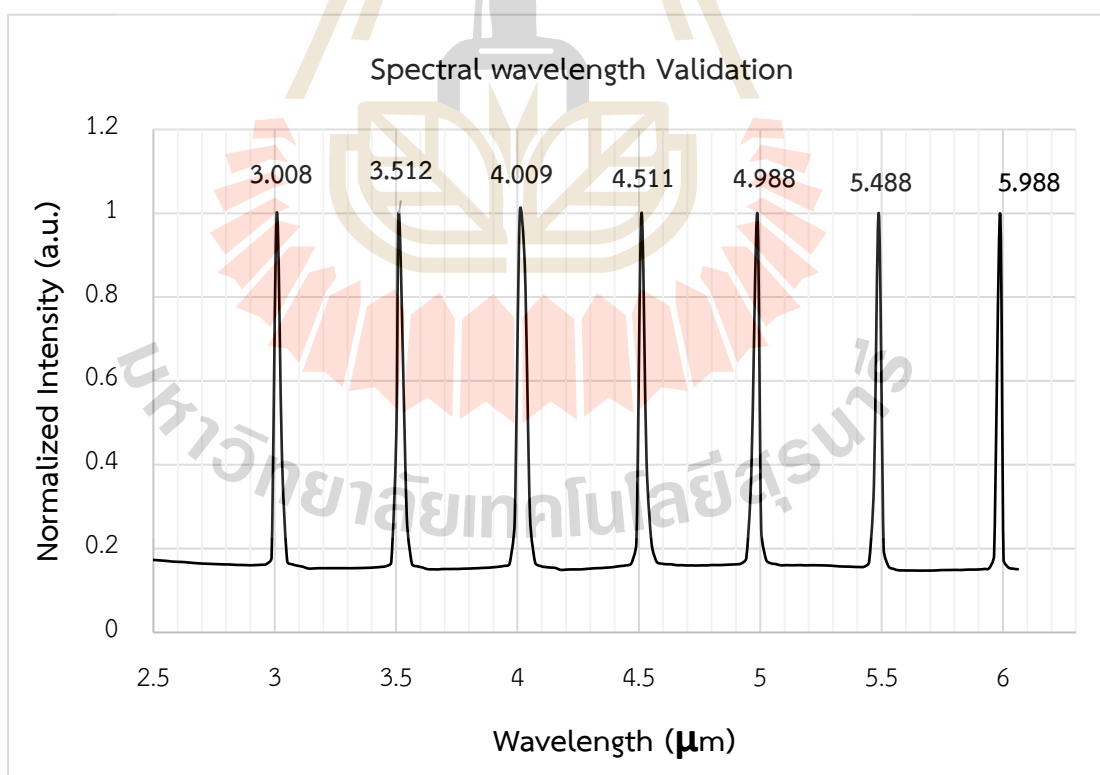
การสร้างระบบสำหรับติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง OPO เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของระบบ โดยใช้กระจก OAP ระยะโฟกัส 25.4 มิลลิเมตร สำหรับโฟกัสแสงจาก OPO เข้าสู่สายเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติก แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) จากนั้นลำเลียงคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสง OPO ผ่านเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติกติดตั้งบริเวณส่วนที่ 1 ของระบบโดยใช้กระจก OAP ระยะโฟกัส 25.4 มิลลิเมตร และกระจก OAP ระยะโฟกัส 203.2 มิลลิเมตร สำหรับลำเลียงแสงผ่าน beam splitter ทำมุม 45 องศา สะท้อนคลื่นแสงเข้าสู่กระจก OAP ระยะโฟกัส 101.6 มิลลิเมตร เพื่อโฟกัสแสงตกกระทบบนส่วนของตัวอย่างทดลองของระบบการเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 4.13 (ข)



รูปที่ 4.13 (ก) การติดตั้งระบบสำหรับลำเลียงแสงจากแหล่งกำเนิดแสง OPO โดยใช้สายเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติก (ข) ตำแหน่งการติดตั้งสายเส้นใยนำแสงไฟเบอร์ออฟติกเข้ากับระบบการเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรด

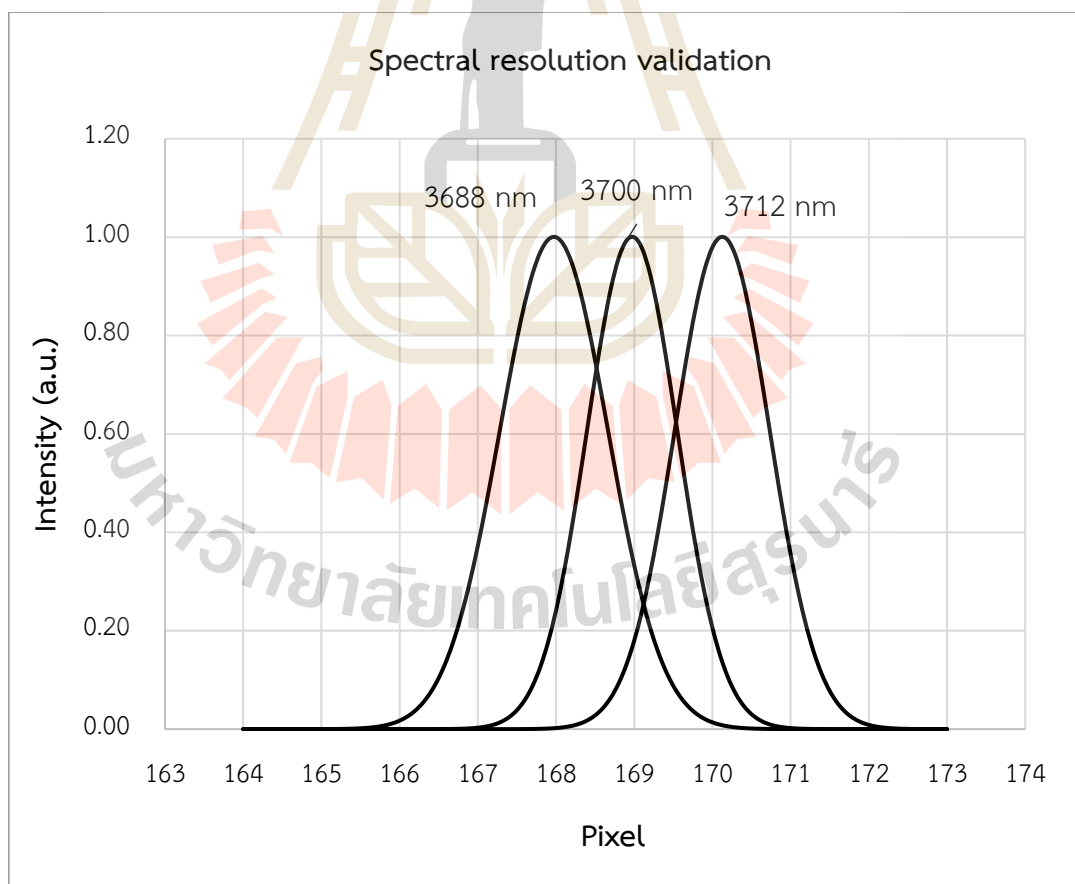


ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของระบบโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง OPO สำหรับเครื่องสเปกโทมิเตอร์แบบเลี้ยวเบนที่สร้างขึ้นตามหลักการ Czerny–Turner (Guenther and Duncan, 2018) และ (Palmer and Loewen, 2005) และมีการใช้เครื่องตรวจวัดไมโครโพลมิเตอร์เพื่อตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมอินฟราเรด โดยอัลกอริทึมสำหรับการหมุนมุมของเกรตติงเลี้ยวเบนสอดคล้องกับสมการเกรตติงเลี้ยวเบนดังแสดงในหัวข้อ 4.3 การจัดแนวแสงของสเปกโทมิเตอร์มีตำแหน่งอ้างอิงของการเลี้ยวเบนอันดับศูนย์ที่มุมตกกระทบ 14.5 องศาและมุมเลี้ยวเบนที่ -14.5 องศา กับแนวเส้นปกติของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสง OPO ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ปรับค่าความยาวคลื่นสำหรับช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรด ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำช่วงความยาวคลื่น 3 ถึง 6 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.14 สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง พบว่าสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของระบบมีความคาดเคลื่อนสูงสุดไม่มากกว่า 0.007 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับความยาวคลื่นที่ปรับตั้งแหล่งกำเนิดแสง OPO



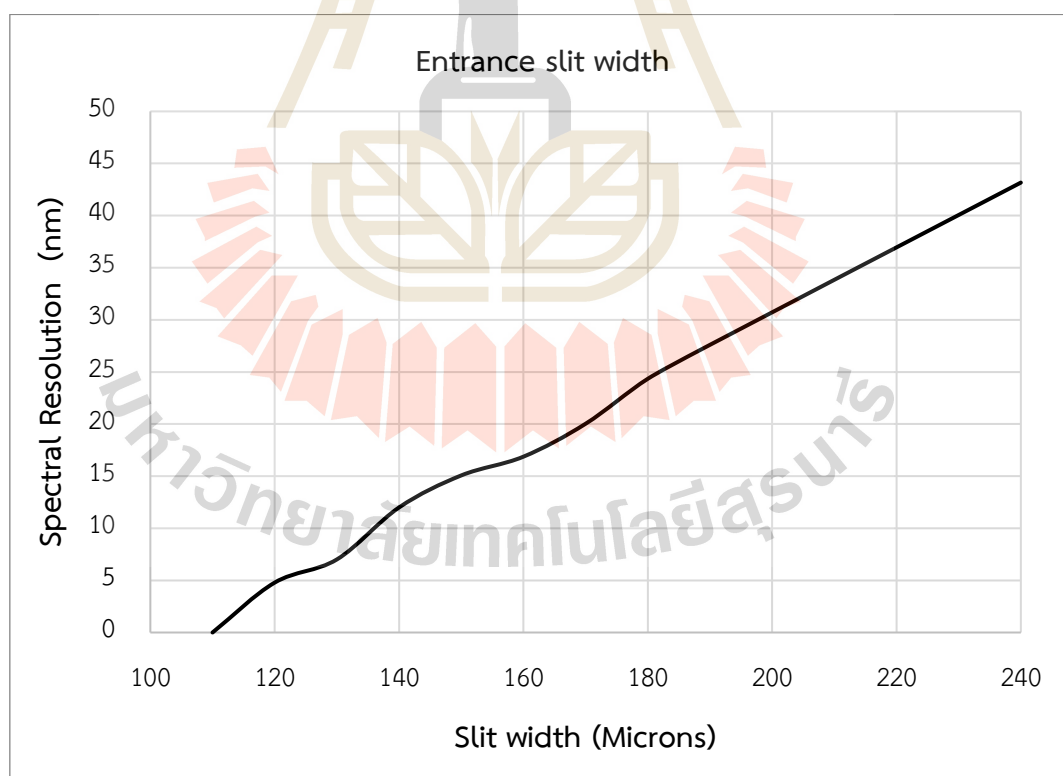
รูปที่ 4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของสเปกตรัมประจำช่วงความยาวคลื่น 3 ถึง 6 ไมโครเมตร ด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO

การตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมโดยการกำหนดค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง OPO เพิ่มและลดค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงครั้งละ 1 นาโนเมตร รอบค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง (Center wavelength) ตรวจวัดที่ความกว้างของช่องเปิดแสงเข้า 140 ไมโครเมตร กำหนดความยาวคลื่นศูนย์กลาง 3700 นาโนเมตร สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นศูนย์กลางตกกระทบบที่พิกเซล 169 ของตัวตรวจวัดไมโครโบลอมิเตอร์ พบว่าสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นที่เพิ่มและลดครั้งละ 1 นาโนเมตร ของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น 3689 ถึง 3699 นาโนเมตร และ 3701 ถึง 3711 นาโนเมตร สัญญาณตกกระทบบที่พิกเซล 169 และสัญญาณของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น 3688 และ 3712 นาโนเมตร สัญญาณตกกระทบบที่พิกเซล 168 และ 170 ตามลำดับ บ่งชี้ว่าค่าการแยกขีดของสเปกตรัม คือ 12 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15 ดังนั้น ค่าการแยกขีดของสเปกตรัมจึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการกำหนดความละเอียดของการหมุนมุมเกรตติง เลี้ยวเบนเพื่อเพิ่มค่าการแยกขีดของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น



รูปที่ 4.15 การตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO

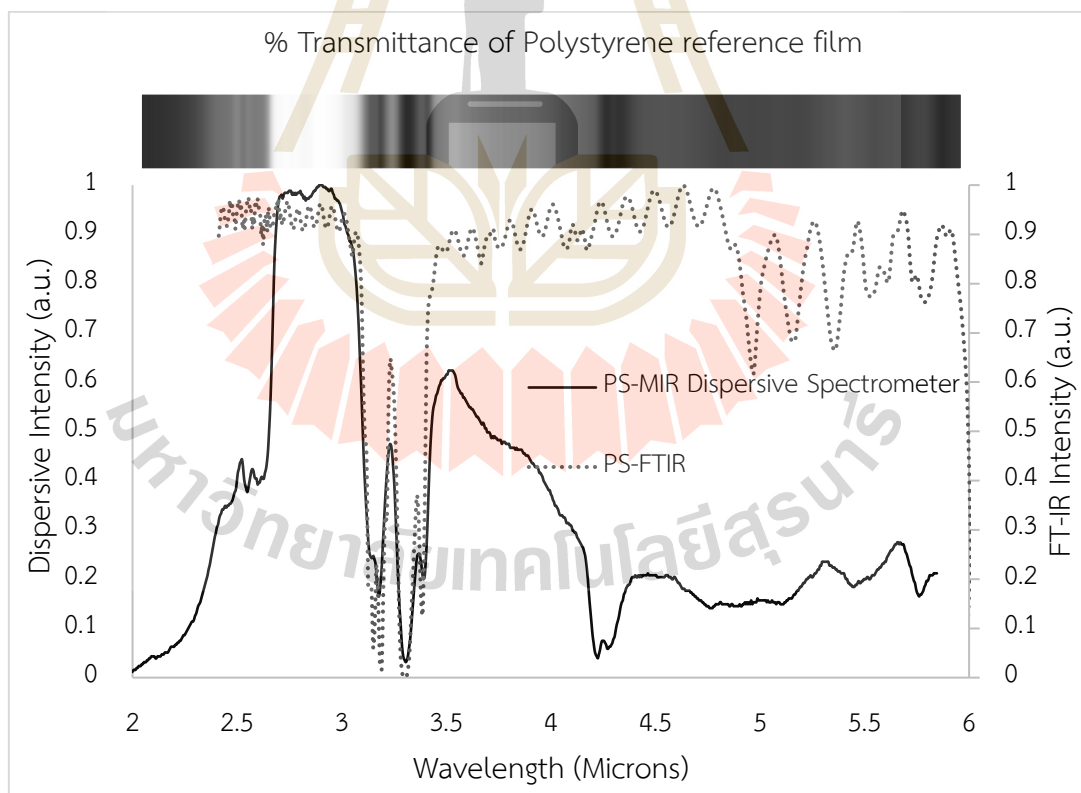
การตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมซึ่งเปลี่ยนตามค่าความกว้างของช่องเปิดแสงเข้า (Entrance slit) ด้วยแหล่งกำเนิดแสง OPO ที่ความยาวคลื่น 3700 นาโนเมตร โดยการตรวจวัดสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง ของตัวอย่างทดลองกระจกเคลือบอลูมิเนียม เริ่มจากการปิดช่องเปิดแสงเข้า (Slit width = 0 ไมโครเมตร) และเมื่อเปิดช่องเปิดแสงเข้ากว้างขึ้น พบว่าค่าการแยกขีดของสเปกตรัมมีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากความกว้างของช่องเปิดแสงเข้าที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่าความกว้างของช่องเปิดแสงเข้าจึงอิทธิพลโดยตรงกับค่าการแยกขีดของสเปกตรัม เนื่องจากส่งผลให้ค่าการแยกขีดของสเปกตรัมมีความละเอียดลดลง แสดงดังรูปที่ 4.16 ที่ความกว้างของช่องเปิดแสงเข้า 140 ไมโครเมตร ค่าการแยกขีดของสเปกตรัมสูงสุด คือ 12 นาโนเมตร โดยการตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมซึ่งเปลี่ยนตามค่าความกว้างของช่องเปิดแสงเข้า ใช้สำหรับกำหนดค่าการแยกขีดของสเปกตรัมสูงสุดของการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่าสัญญาณการสะท้อนพื้นผิวที่ต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่มีค่าสัญญาณการสะท้อนพื้นผิวต่ำจำเป็นต้องเปิดช่องแคบแสงเข้าให้กว้างมากขึ้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความกว้างของช่องเปิดแสงเข้าและการแยกขีดของสเปกตรัม (Spectral Resolution)

#### 4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด โดยใช้มาตรฐานพอลิสไตรีน (Polystyrene)

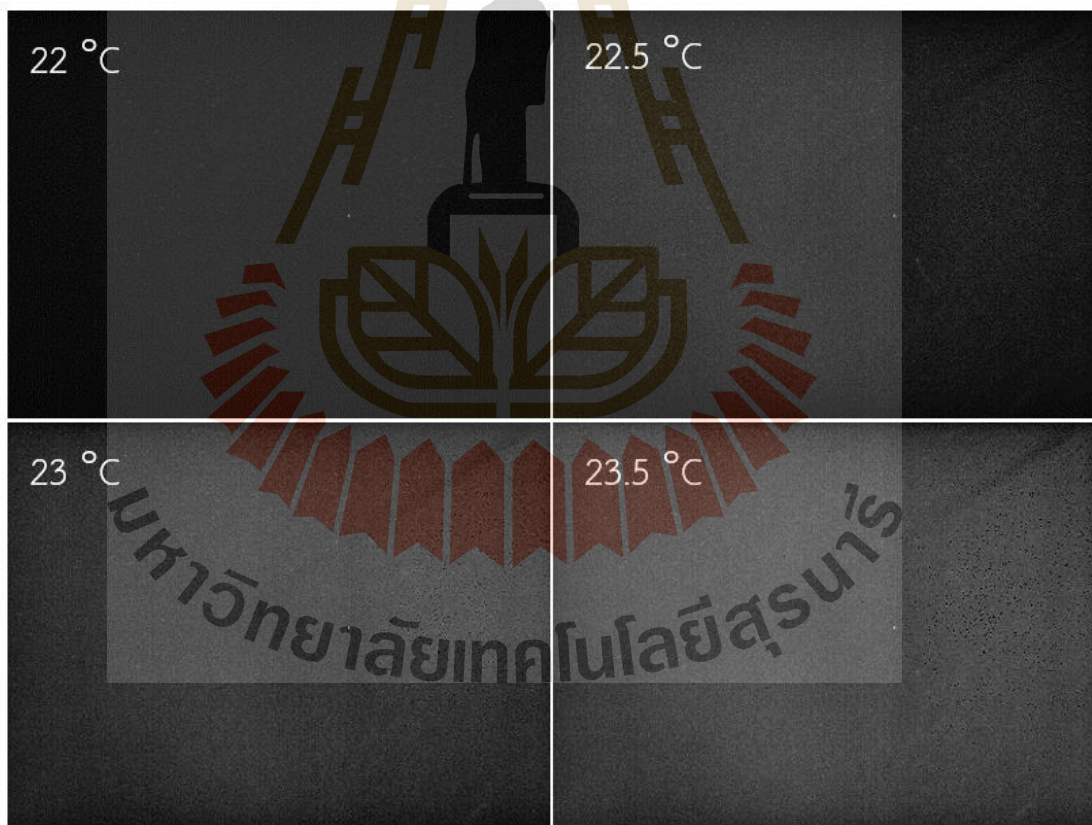
ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าสเปกตรัมอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่น 2 ถึง 6 ไมโครเมตร ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Globar และมาตรฐานพอลิสไตรีน (Lanzarotta et al., 2012; Elmore et al., 2012) และ (Mark and Workman, 2018) โดยภาพของสัญญาณการเลี้ยวเบนและสเปกตรัมการส่องผ่านที่ตรวจวัดโดยระบบสเปกโตรมิเตอร์ที่สร้างขึ้น (PS-MIR Dispersive spectrometer) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานพอลิสไตรีนที่ตรวจวัดโดยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer มาตรฐาน รุ่น Nicolet 510 ที่ค่าการแยกขีดเลขคลื่น  $8 \text{ cm}^{-1}$  (PS-FTIR) แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าสามารถแยกสเปกตรัมประจำควายาวคลื่นได้อย่างชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น 2 ถึง 6 ไมโครเมตร ซึ่งมีพิคหลักของการส่องผ่านแผ่นมาตรฐานพอลิสไตรีน รวมถึงการแสดงพิคหลักของแหล่งกำเนิดแสง Globar ช่วงสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น 4.2 ถึง 4.3  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นช่วงสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนโดยคาร์บอนไดออกไซด์ (Floria et al., 2020)



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการส่องผ่านของมาตรฐานพอลิสไตรีน NIST SRM 1921b ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer และเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง

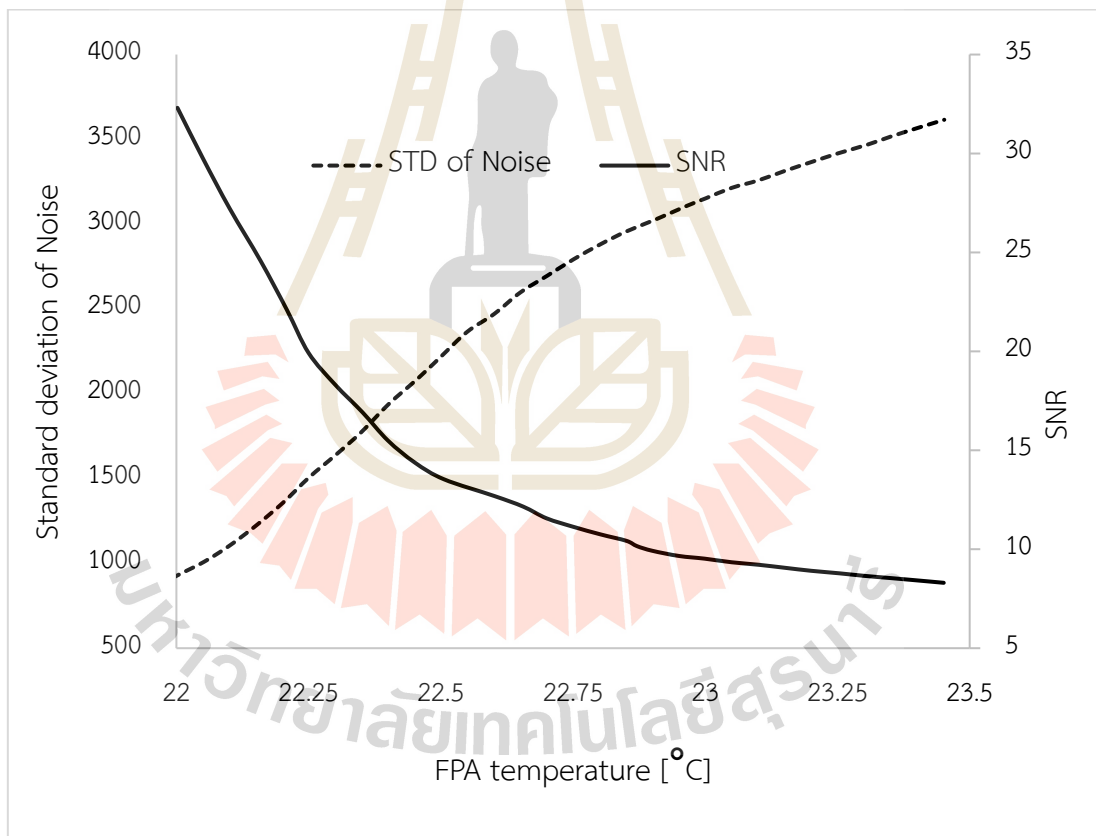
#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดด้านเทคนิคของการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลิมิเตอร์สำหรับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบน

ผลกระทบของพลังงานความร้อนต่อสัญญาณสเปกตรัมเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะตรวจวัดสัญญาณเนื่องจากเครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลิมิเตอร์เป็นชนิดไม่มีระบบระบายความร้อนแบบไนโตรเจนเหลว พบว่าผลกระทบของความร้อนมีผลต่อค่าอุณหภูมิ Focal Plane Array (FPA) ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ภายใต้การตรวจวัดที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ส่งผลกระทบต่อค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) แสดงดังรูปที่ 4.18 ค่าอุณหภูมิ FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ ณ อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ถึง 23.5 องศาเซลเซียส จะมีค่าความเข้มสัญญาณรบกวนพื้นหลังประจำพิกเซลของไมโครโบลิมิเตอร์แตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.18 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์สำหรับช่วงอุณหภูมิ FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ 22 ถึง 23.5 องศาเซลเซียส

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ซึ่งส่งผลให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนพื้นหลังจากตัวตรวจวัด (Standard deviation of Noise) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.19 (-- STD of Noise) เมื่อคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise ratio, SNR) ดังสมการที่ 2.11 (Usamentiaga, 2018; Deane, 2020) ด้วยข้อมูล ความเข้มของสัญญาณประจำพิกเซลของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์ชนิดข้อมูล 16 บิต (bits) และ จำนวนครั้งการเฉลี่ยข้อมูล 64 ครั้ง ( $N_{Average}$ ) ที่ช่องเปิดแสงเข้าของสเปกโทรมิเตอร์ 140 ไมโครเมตร และหมูนุ่มของเกดติงเลี้ยวเบนที่มุมสำหรับการเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 สำหรับตัวอย่างทดลองกระจก เคลือบอลูมิเนียม พบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า เท่ากับ 32 และมีค่าลดลงเมื่อ อุณหภูมิ FPA ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.19 (-SNR)



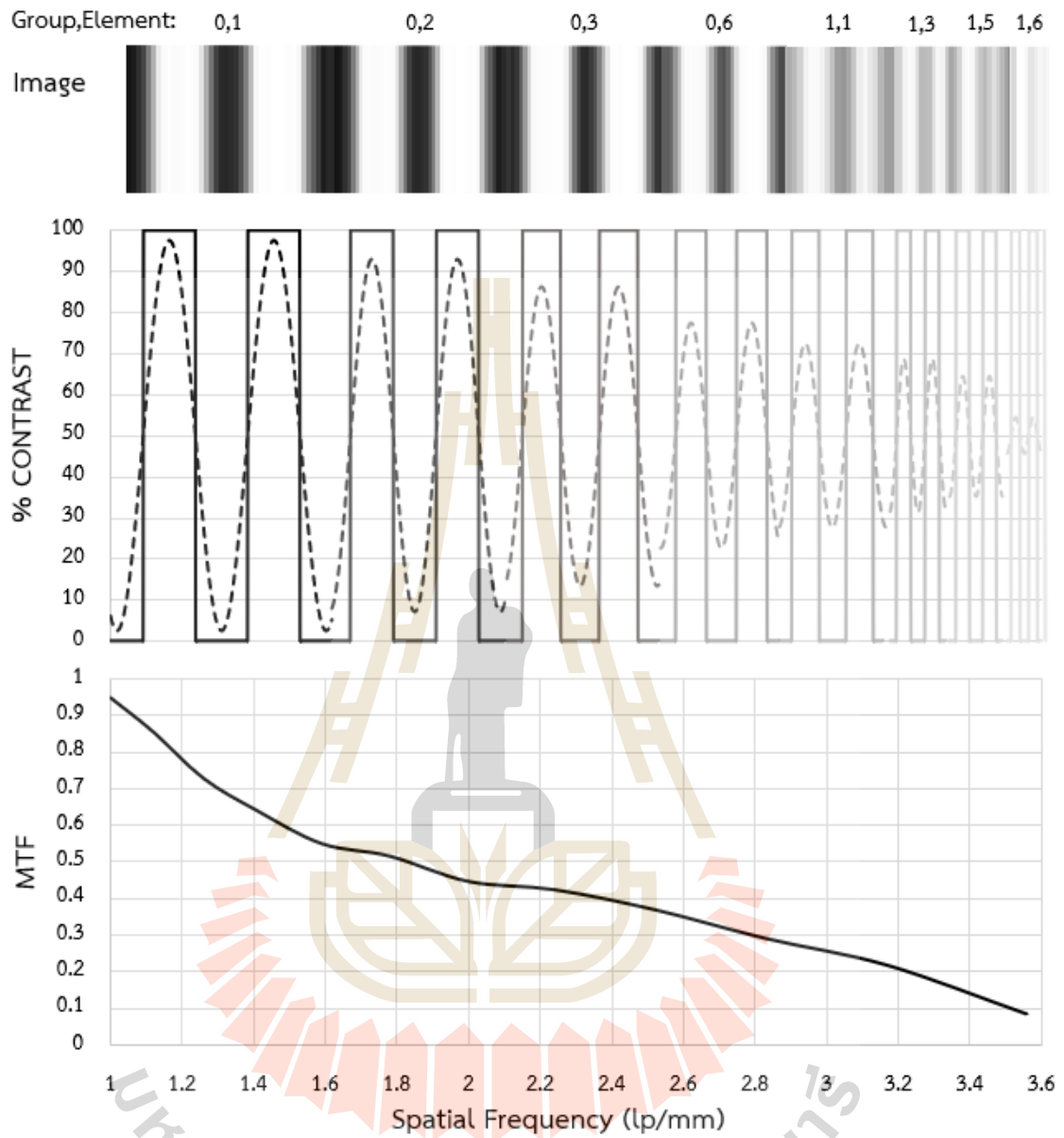
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Standard deviation of Noise) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) กับอุณหภูมิ Focal Plane Array (FPA) ของตัวตรวจวัดไมโครโบลิมิเตอร์



ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดของระบบที่เป็นได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2.11 คือ 64.536 ที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนพื้นหลังเท่ากับ 1000 ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบขึ้นกับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง ค่ากำลังของแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ทางแสงสำหรับส่วนการเก็บสัญญาณค่าการสะท้อนจากตัวอย่างวิเคราะห์ จึงเป็นข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิเมเตอร์ชนิดไม่มีระบบควบคุมความร้อนสำหรับงานทางสเปกโทสโคปีกับตัวอย่างวิเคราะห์ที่มีค่าพลังงานสะท้อนพื้นผิวต่ำและในทางตรงกันข้ามไมโครโพลิเมเตอร์เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณความร้อนชนิดไม่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในโตรเจนเหลวซึ่งมีขนาดใหญ่จึงเป็นข้อได้เปรียบด้านหนึ่งสำหรับสร้างระบบสเปกโทมิเตอร์ให้มีขนาดเล็กและสามารถนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานสำหรับพื้นที่ขนาดจำกัดได้ นอกจากนี้ข้อได้เปรียบเรื่องต้นทุนสำหรับการสร้างระบบที่ต่ำกว่าการใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณแบบคอนดัคทีฟ ชนิด 1 พิกเซล ซึ่งตัวตรวจวัดไมโครโพลิเมเตอร์เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณชนิดอาร์เรย์ 2 มิติ จึงเป็นข้อได้เปรียบสำหรับการตรวจวัดสัญญาณแบบระบบสเปกตรัมประจำตำแหน่งของตัวอย่างวิเคราะห์

การวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมประจำตำแหน่งของระบบสเปกโทมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิเมเตอร์ชนิดอาร์เรย์ โดยแนวพิกเซลอาร์เรย์ในแนวแกนตั้ง สำหรับตรวจวัดค่าสัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นซึ่งตรวจสอบค่าการแยกขีดของสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นแสดงดังหัวข้อ 4.4.1 และแนวพิกเซลอาร์เรย์ในแนวแกนนอน สำหรับการตรวจวัดสัญญาณแบบระบบสเปกตรัมประจำตำแหน่งเชิงเส้นของตัวอย่างวิเคราะห์ โดยผลการตรวจสอบค่าการแยกขีดเชิงตำแหน่งเชิงเส้นของตัวอย่างทดลองกระจกเรียบผิวสะท้อนเคลือบด้วยอลูมิเนียมด้วยแผ่นมาตรฐาน 1951 USAF Resolution Target (Peter and Dieter, 2006) แสดงดังรูปที่ 4.20 ประกอบด้วยสัญญาณภาพเชิงตำแหน่งประจำ Group 0, Element 1 ถึง 6 และ Group 1, Element 1 ถึง 6 จากนั้นคำนวณค่าการเปรียบเทียบการแยก (Contrast) ของสัญญาณสูงสุดและต่ำสุดประจำ Group และ Element ด้วยสมการที่ 2.10 และคำนวณค่าการแยกขีดเชิงตำแหน่งด้วยสมการที่ 3.3 พบว่าที่ฟังก์ชันความเปรียบต่าง (Modulation transfer function) 51 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการแยกขีดเชิงตำแหน่งของระบบ เท่ากับ 280 ไมโครเมตร (Group 0, Element 6 และ Spatial Frequency 1.78 lp/mm)





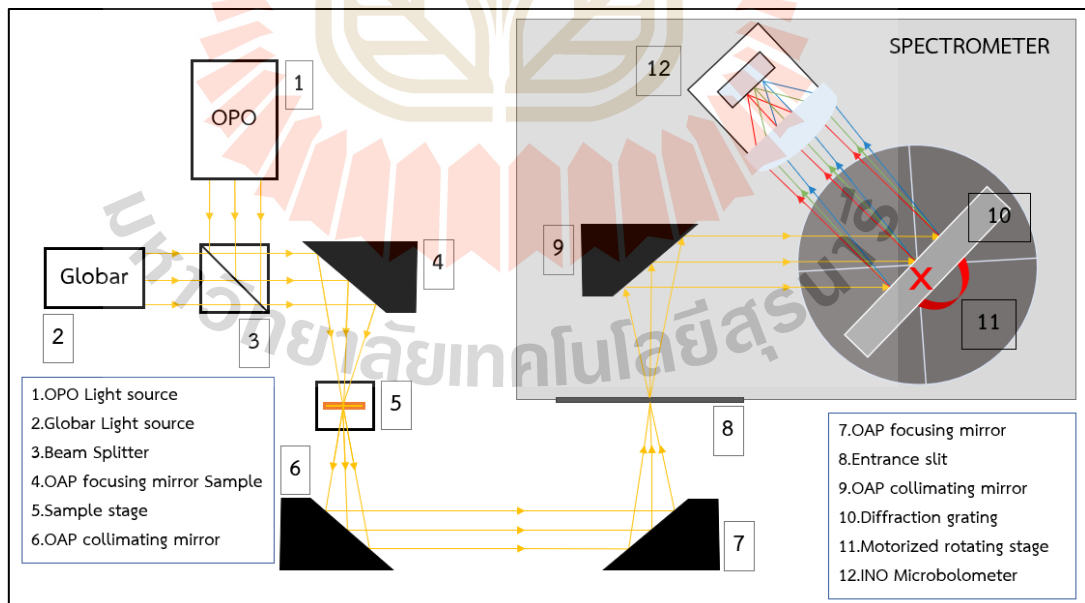
รูปที่ 4.20 ผลการตรวจสอบการแยกขีดตำแหน่งเชิงเส้นด้วยแผ่นมาตรฐาน USAF 1951 Resolution Calculator กลุ่มที่ 0 และ 1 สำหรับคู่เส้น 1 ถึง 6 ประกอบด้วยสัญญาณภาพ ความสัมพันธ์ของการเปรียบเทียบการแยก (Contrast) ระหว่างแผ่นมาตรฐาน (-) กับสัญญาณตรวจวัดของระบบ (--) และความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความเปรียบต่าง (Modulation transfer function) กับค่าความถี่เชิงตำแหน่ง (Spatial Frequency) ของระบบ

#### 4.5 ตัวแปรที่สำคัญของระบบสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์

ผลสรุปสำหรับการสร้างระบบสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์ โดยตัวแปรที่สำคัญของระบบ แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพรวมส่วนประกอบทั้งหมดของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปตัวแปรที่สำคัญของระบบสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์

Parameters	Values
Spectral range	2–6 $\mu\text{m}$
Disperser	300 grooves/mm grating
Detector type	Uncooled microbolometer VOx
Detector size	35 $\mu\text{m}$ pixel pitch
Spectral resolution	12 nm/pixel at 3700 nm
Spatial resolution	3.5 lp/mm or 140 $\mu\text{m}$
Signal-to-noise ratio	32 (SNR, operated at 20 °C)



รูปที่ 4.21 ส่วนประกอบของระบบตรวจวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโบลอมิเตอร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยเรื่องระบบการควบคุมและเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิมิเตอร์ เพื่อศึกษาและสร้างระบบการตรวจวิเคราะห์สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านมิดอินฟราเรด รวมถึงประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การศึกษาและสร้างระบบวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรดด้วยหลักการของ Czerny-Turner โดยใช้เกรตติงเลี้ยวเบนชนิดสะท้อนเคลือบด้วยอลูมิเนียม 300 ร่องต่อมิลลิเมตร พบว่าสำหรับการตรวจวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมในย่านมิดอินฟราเรดนั้น จำเป็นต้องใช้การหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อตรวจวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่น เนื่องจากค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดมีการเลี้ยวเบนกว้างกว่าขนาดของเครื่องตรวจวัดสัญญาณไมโครโพลิมิเตอร์ ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างระบบควบคุมการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนสำหรับตรวจวิเคราะห์สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด

ระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงแบบอัตโนมัติโดยใช้ภาษา NI LabView สำหรับการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการหมุนเกรตติงเลี้ยวเบน โดยสามารถกำหนดค่าการแยกขีดของสเปกตรัม, ค่าความยาวคลื่นเริ่มต้นและค่าช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัม โดยการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณใช้แหล่งกำเนิดแสงพัลส์เลเซอร์ OPO พบว่ามีค่าการแยกขีดของสเปกตรัม 12 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 3700 นาโนเมตร

การประยุกต์ใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิมิเตอร์สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่า ข้อดีของเครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิมิเตอร์ คือ การเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณอินฟราเรดชนิดอาเรย์ 2 มิติ ซึ่งสามารถตรวจวัดสัญญาณแบบตำแหน่งเชิงเส้น ซึ่งราคาต่ำกว่าตัวตรวจวัดสัญญาณแบบควอนตัม ชนิด 1 พิกเซล ค่อนข้างมากและเป็นเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิดไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิไนโตรเจนเหลวขนาดใหญ่ สำหรับส่วนของข้อจำกัดเครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบไมโครโพลิมิเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัดสัญญาณความถี่อินฟราเรดนั้นมีความแปรปรวนของสัญญาณเมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการหมุนเกรตติง เลี้ยวเบน ผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณประจำมุมหมุนเกรตติงเลี้ยวแบบพิกเซลเชิงเส้นเพื่อตรวจวัดสัญญาณ 1 ความยาวคลื่นต่อองศาการหมุนมุม ซึ่งสามารถออกแบบประยุกต์อัลกอริทึมสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดสัญญาณการเลี้ยวเบนให้รวดเร็วขึ้นโดยการใช้ประโยชน์ของตัวตรวจวัดชนิด FPA สำหรับตรวจวัดสัญญาณประจำมุมหมุนเกรตติงเลี้ยวเบนมากกว่า 1 ความยาวคลื่นต่อองศาการหมุน ซึ่งสามารถนำอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้งานด้านตรวจวิเคราะห์และประมวลผลค่าสัญญาณทางสเปกโทรสโกปีสำหรับค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

นอกจากการใช้ภาษา NI LabView สำหรับการพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมระบบ ในผลงานวิจัยนี้ยังกล่าวถึงการสร้างอัลกอริทึมโดยใช้ภาษา Python ดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นภาษาที่มีการพัฒนาอัลกอริทึมเกี่ยวกับงานทางด้าน AI Machine learning Spectral Classification ด้วยภาษา Python (Alanah et al., 2023) จึงสามารถนำอัลกอริทึมนี้พัฒนาต่อเพื่อเป็นอัลกอริทึมที่ครอบคลุมมากขึ้น อาทิเช่น การพัฒนาทางการตรวจแยกสายพันธุ์ข้าวแบบอัตโนมัติด้วยโมเดลการ Classification สัญญาณสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นของข้าวต่างสายพันธุ์ ซึ่งโมเดลต่างๆของภาษา Python ที่มีความแม่นยำสูงมีค่อนข้างแพร่หลายและสามารถเข้าถึงโมเดลต่างๆได้



## รายการอ้างอิง

- Guenther, B. D., & Duncan, G. S. (2018). *Encyclopedia of Modern Optics*. (2nd ed.). UK: Elsevier.
- Palmer, C., & Loewen, E. (2005). *Diffraction Grating Handbook*. (8th ed.). CA, USA: Newport Corporation.
- Wilson, C. G., Que, L., & Gianchandani, Y. B. (2005). Microfluidic Electrodischarge Devices with Integrated Dispersion Optics for Spectral Analysis of Water Impurities. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(2), 185-191. doi:10.1109/JMEMS.2004.839337.
- Kim, M. S., Chen, Y. R., & Mehl, P.M. (2001). Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. *American Society of Agricultural Engineers*, 44(3), 721–729. doi: 10.13031/2013.6099.
- Siripatrawan, U., Makino, Y., Kawagoe, Y., & Oshita, S. (2011). Rapid detection of *Escherichia coli* contamination in packaged fresh spinach using hyperspectral imaging. *Talanta*, 85(1). doi:10.1016/j.talanta.2011.03.061.
- Veraverbeke, E. A., Lammertyn, J., Nicola, B. M., & Irudayaraj, J. (2005). Spectroscopic evaluation of the surface quality of apple. *J. Agr. Food Chem.*, 53 (4), 1046–1051. doi:10.1021/jf0486848
- Garg, A., Sharma, R., & Dhingra, V. (2009). Development of an Automated Modern Undergraduate Optics Laboratory using LabVIEW. *Proceedings ETOP 2009*, North Wales, UK. doi:10.1364/ETOP.2009.ETA3
- Marques, M. B., Rosa, C. C., & Marques, P. V. S. (2015). Eight year experience in open ended instrumentation laboratory. *Education and Training in Optics and Photonics*, ETOP 2015 9793, pg. 979327. doi:10.1117/12.2223201
- Garg, A., Sharma, R., & Dhingra, V. (2011). Innovating spectrometry studies at undergraduate level using a linear CCD array. *Novel Optical Systems Design and Optimization*. XIV 8129. doi:10.1117/12.893563

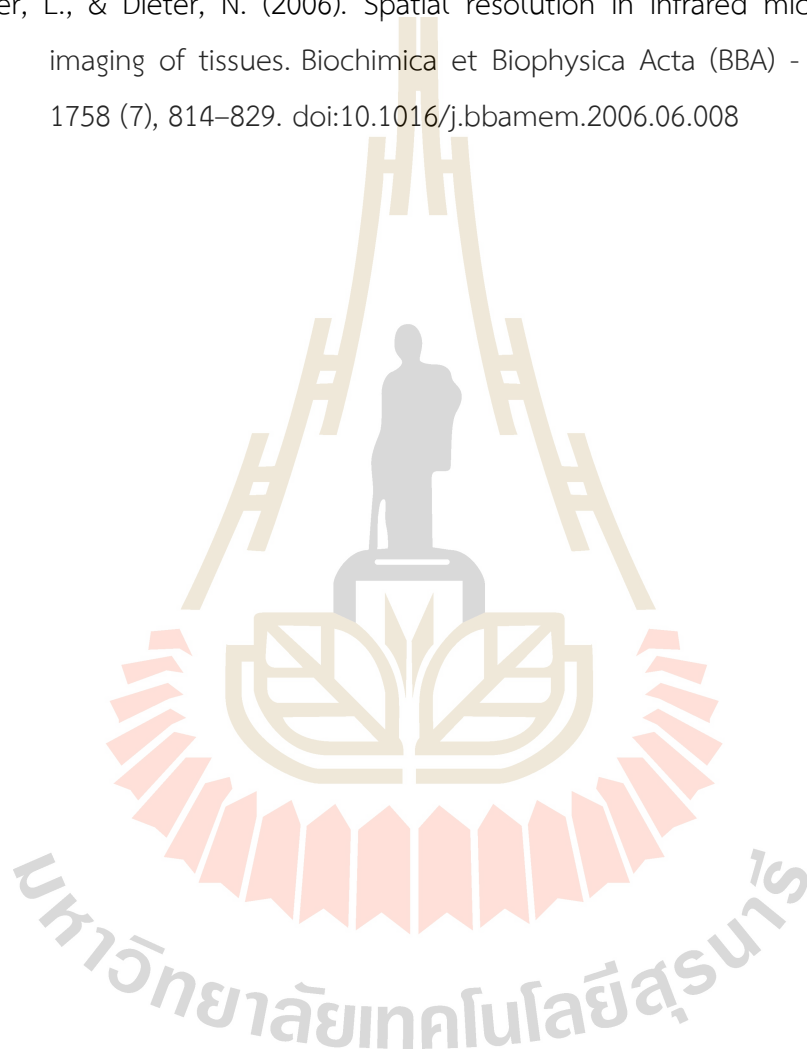
- Honniball, C. I. (2017). Spectral response of Microbolometers for Hyperspectral imaging (Master's thesis), University of Hawaii, Manoa.
- Wu, Q., Wang L., & Zu, L. (2011). A LabVIEW-Based Virtual Instrument System for Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy. *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, 2011:457156. doi:10.1155/2011/457156
- Mark, H., & Workman, J. (2018). Using Reference Materials, Part I: Standards for Aligning the X-Axis. *Pittcon Spectroscopy*, 34(2). doi:10.1016/B978-0-12-805309-6.00124-0
- Lanzarotta, A., Marcott, C., Story, G., Dowrey, A., & Sommer, A. (2012). Infrared Microspectroscopy Using Prism-Based Spectrographs and Focal Plane Array Detection. *Appl. Spectrosc.* 66, 304–311. doi:10.1366/11-06412.
- Usamentiaga, R., Ibarra-Castanedo, C., & Maldague, X.P. (2018). More than Fifty Shades of Grey: Quantitative Characterization of Defects and Interpretation Using SNR and CNR. *J. Nondestruct. Eval.* 37, 25. doi:10.1007/s10921-018-0479-z.
- Deane, S., Avdelidis, N. P., Ibarra-Castanedo, C., Zhang, H., Nezhad, H. Y., Williamson, A. A., ... Nooralishahi, P. (2020). Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites. *Sensors*, 20, 3381. doi:10.3390/s20123381.
- Elmore, D., Tsao, M. W., Frisk, S., Chase, D., & Rabolt, J. (2002). Design and Performance of a Planar Array Infrared Spectrograph That Operates in the 3400 to 2000  $\text{cm}^{-1}$  Region. *Appl. Spectrosc.* 56, 145–149. doi:10.1366/0003702021954449.
- William, R. J., Simon, J. H., & Steven, M. (2012). Microbolometer imaging spectrometer. *Opt. Lett.* 37, 803–805. doi:10.1364/OL.37.000803
- Leijtens, J., Helden, W., Breussin, F., Smorenburg, C., Escudero, I., Boslooper, E., & Visser, H. (2017). Microbolometer spectrometer opens hoist of new applications. In *Proceedings of the International Conference on Space Optics*, Toulouse, France. doi:10.1117/12.2307992
- Fisette, B., Tremblay, M., Oulachgar, H., Généreux, F., Béland, D., Beaupre, P., ... Terroux, M. (2017). Novel vacuum packaged 384 × 288 broadband

- bolometer FPA with enhanced absorption in 3–14  $\mu\text{m}$  wavelength. 101771. doi:10.1117/12.2255747
- Fisette, B., Génèreux, F., Béland, D., Topart, P., Tremblay, M., Desroches, Y., ... Picard, F. (2018). Customized packaged bolometers in niche applications at INO. Proc. SPIE, 10656, 106560H. doi:10.1117/12.2303513
- Floria, O. B., Carlos, E. H., Henrik, R., Hans, M., Hans, S., & Kristinn, B. G. (2020). Carbon dioxide absorption spectroscopy with a MIR silicon photonic waveguide. Opt. Lett., 45, 109–112. doi:10.1364/OL.45.000109
- Mohazzabi, P., Mattson, D. J., & Joel-Ambriz P. J. (2019). Diffraction Pattern of a Rotated Grating. Journal of Applied Mathematics and Physics, 7, 1870-1876. doi:10.4236/jamp.2019.78128
- Dulski, R., Powalisz, P., Kastek, M., & Trzaskawka, P. (2010). Enhancing image quality produced by IR cameras. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 7834. doi:10.1117/12.864979
- Olbrycht, R., Wiecek, B., & Kатуza, M. (2014). Spectral infrared analysis in thermal cameras with diffraction gratings. Quantitative InfraRed Thermography. doi:10.21611/qirt.2014.120
- Budzier, H., Krause, V., Böhmer, S., Gerlach, G., & Hoffmann, U. (2010). Fast Microbolometer-based infrared camera system. DIAS Infrared GmbH Publications, No. 20.
- Chimenti, R. V. (2013). Spectrometer knowledge : Spectral Resolution. Retrieved from <https://www.laserfocusworld.com>
- Alanah, G. J., Hand, L., Mills, T., Song, L., Brunt, A. S. J., Bergstrom-Mann, P. E., ... Vallance, C. (2023). Exploring Machine Learning in Chemistry through the Classification of Spectra: An Undergraduate Project. J. Chem. Educ. 100, 3, 1343–1350. doi:10.1021/acs.jchemed.2c00682
- Sánchez-Alvarez, A., Luna-Moreno, D., Hernández-Morales, J.A., Zaragoza-Zambrano, J.O., & Castillo-Guerrero, D.H. (2018). Control of Stepper Motor Rotary Stages applied to optical sensing technique using LabView. Optik, 164, 65–71. doi:10.1016/j.ijleo.2018.02.115



Wang, S., Han, H., Gao, K., Wang, Z., Zhang, C., Yang, M., Wu, Z., & Wu, Z. (2015). A user-friendly LabVIEW software platform for grating based X-ray phase-contrast imaging. *Journal of X-ray science and technology*, 23, 189-99. doi:10.3233/XST-150480

Peter, L., & Dieter, N. (2006). Spatial resolution in infrared microspectroscopic imaging of tissues. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1758 (7), 814–829. doi:10.1016/j.bbamem.2006.06.008



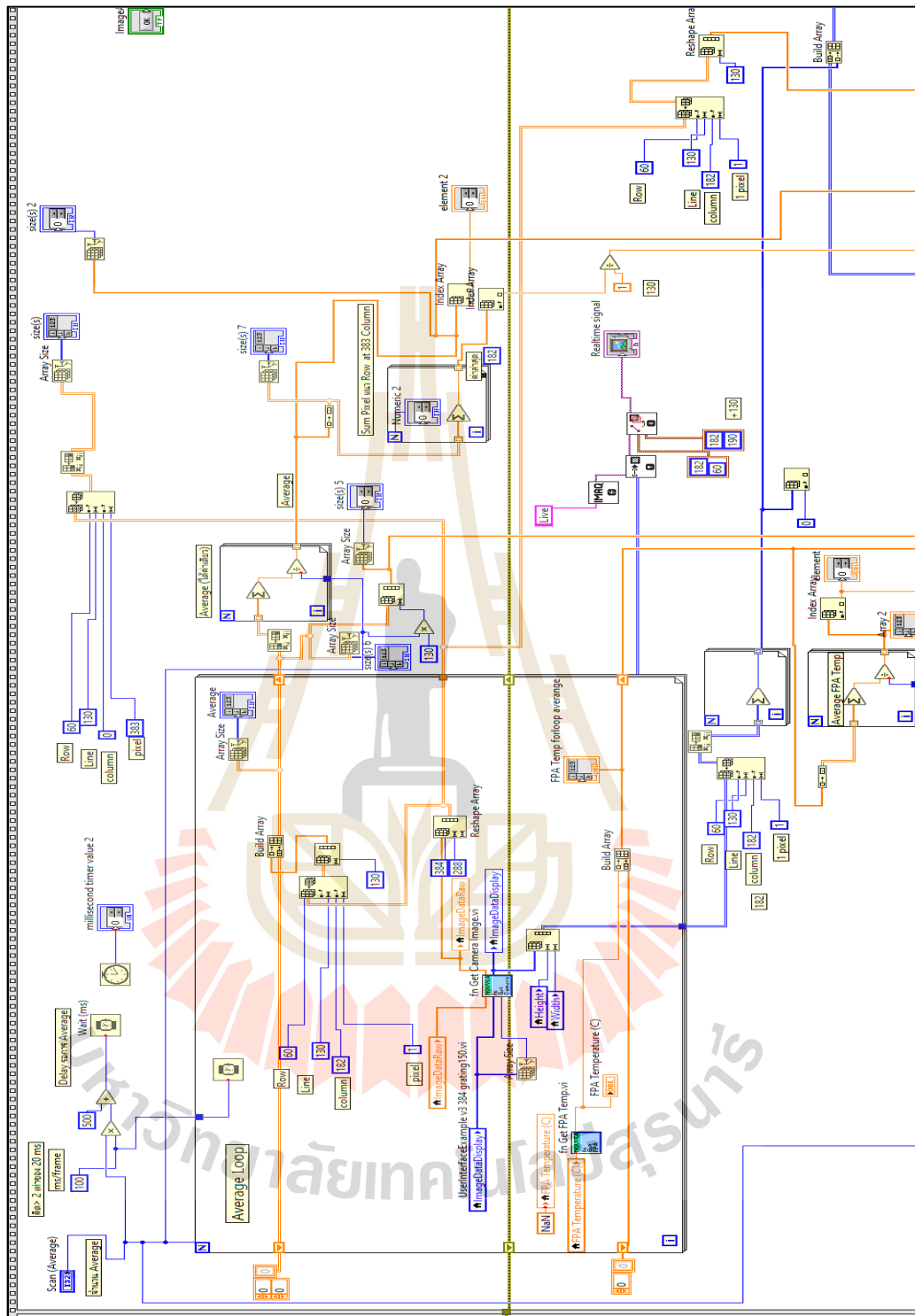


ภาคผนวก ก

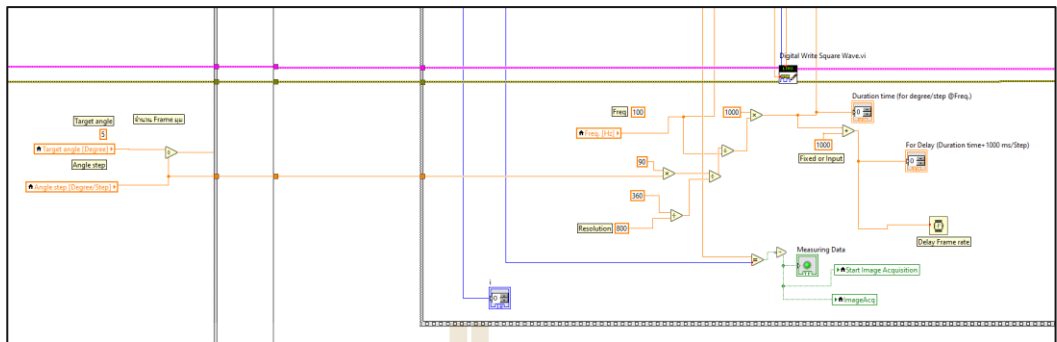
ตัวอย่างการสร้างอัลกอริทึมของระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผล

สัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดด้วยภาษา NI LabView

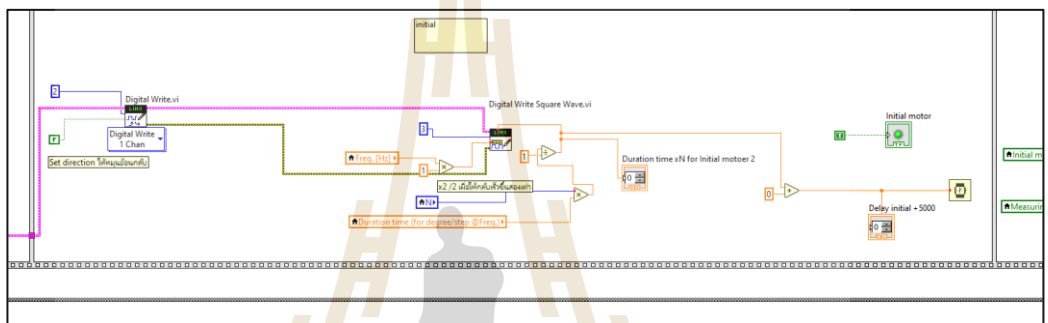
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



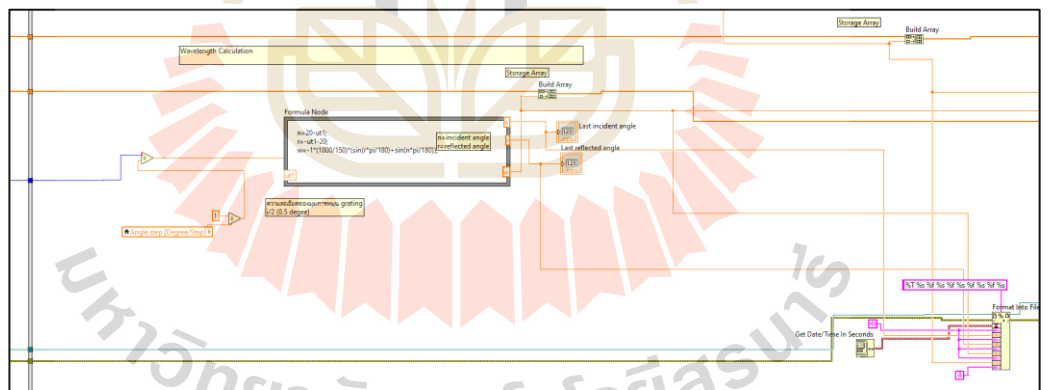
รูปที่ ก. 1 โปรแกรมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ Raw Intensity และ FPA Temperature



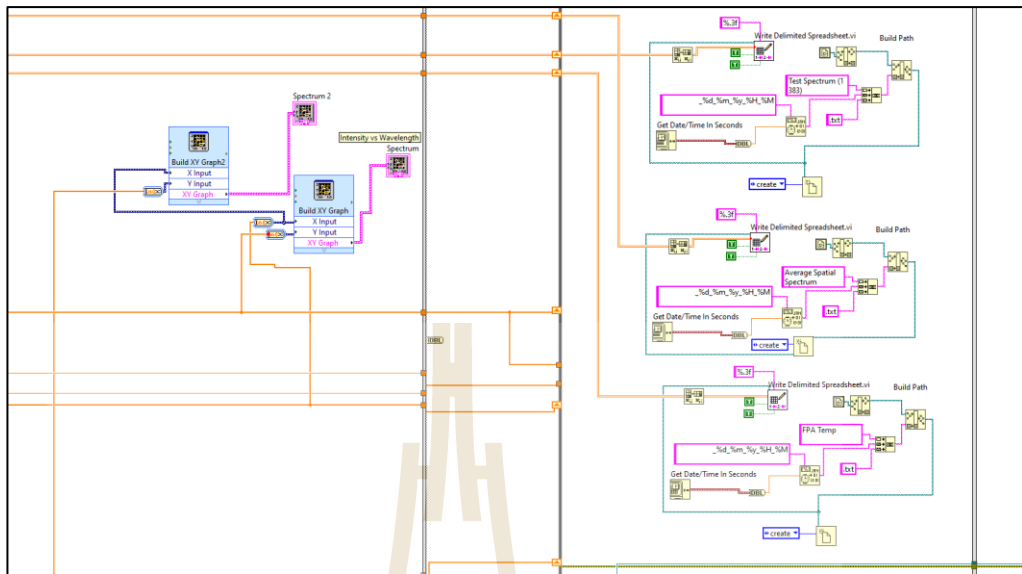
รูปที่ ก. 2 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการหมุนของเกรตติ้งเลี้ยวเบนเพื่อตรวจวัดสัญญาณ



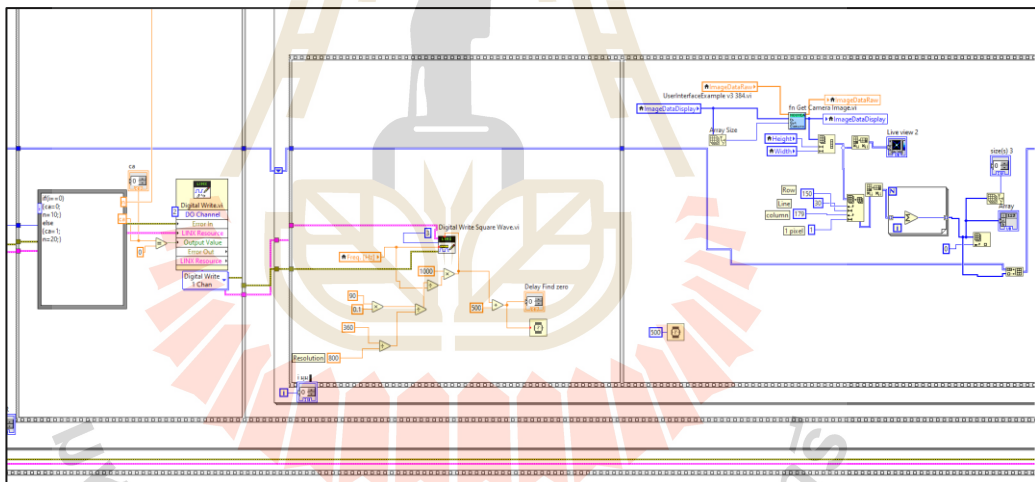
รูปที่ ก. 3 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการหมุนของเกรตติ้งเลี้ยวเบนเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ



รูปที่ ก. 4 โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าความยาวคลื่นประจำมุมหมุนเกรตติ้งเลี้ยวเบน

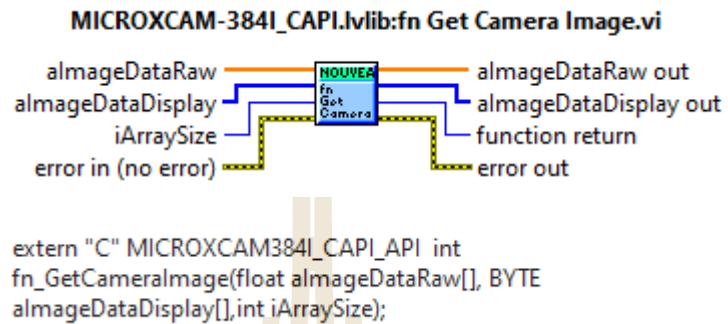


รูปที่ ก. 5 โปรแกรมสำหรับการแสดงผลค่าสเปกตรัมประจำความยาวคลื่นและโปรแกรมสำหรับการบันทึกข้อมูลสัญญาณสเปกตรัมชนิด Full File และ Average File

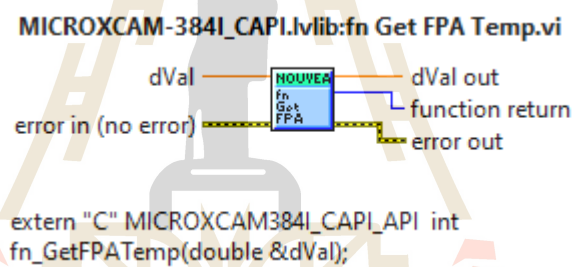


รูปที่ ก. 6 โปรแกรมสำหรับการหาตำแหน่งการเลี้ยวเบนของ zero-order

## Software Development Kit (SDK) INO FPA Microbolometer

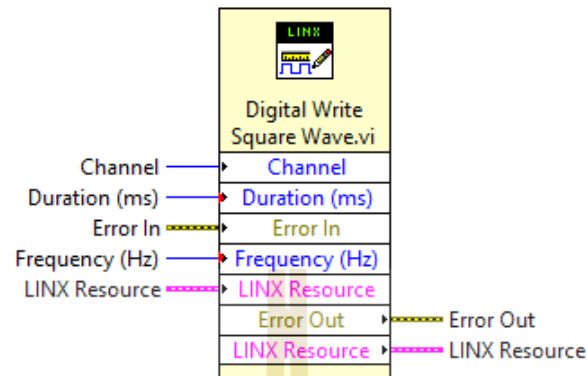


รูปที่ ก. 7 SDK สำหรับการตรวจวัดค่าสัญญาณ Raw 16 bit ของ INO FPA  
Microbolometer



รูปที่ ก. 8 SDK สำหรับการตรวจวัดค่าสัญญาณ FPA Temperature ของ INO FPA  
Microbolometer

### LMH-LINX.lvlib:Digital Write Square Wave.vi



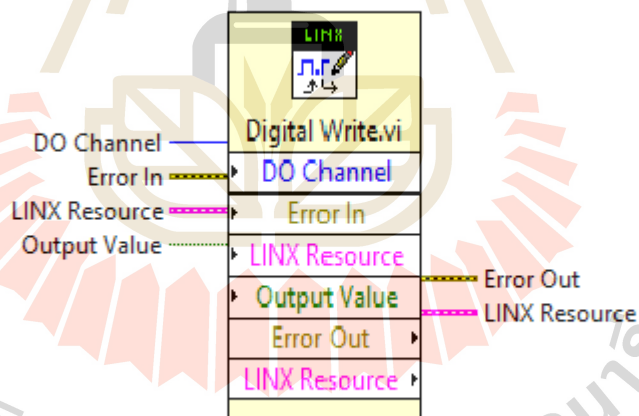
Generate a square wave with the specified frequency for the specified duration. myRIO uses PWM channels for this function while most other devices use a DO channels.

Use a duration of 0 to generate output indefinitely.

Use a frequency of 0 to stop generating output.

รูปที่ ก. 9 SDK สำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์ด้วยสัญญาณพัลส์ ของ LINX

### LMH-LINX.lvlib:Digital Write.vi



Write value(s) to the specified digital output channel(s).

รูปที่ ก. 10 SDK สำหรับควบคุมทิศทาง การหมุนของมอเตอร์ ของ LINX





ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการสร้างอัลกอริทึมของระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผล

สัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดด้วยภาษา Python

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

def premeasurement():
    global Number_step, Du1, Nstep, DegreeRes2, incidentA0, InitialDegree2
    InitialDegree = txtInR.get()
    InitialDegree2 = 17.2 + np.arcsin (InitialDegree/(2*(1000000/150)*np.cos(17.2*(math.pi/180))))*(180/math.pi)
    InitialDegree2 = round(InitialDegree2,1)
    mytxtInIt.delete(0,END)
    mytxtInIt.insert(0,InitialDegree2)
    RTinitW = ((np.sin((InitialDegree2)*(math.pi/180)))+np.sin((InitialDegree2-
        (incidentA0*2)*(math.pi/180)))*(1000000/150)
    RTinitW = round(RTinitW,1)
    mytxtInItW.delete(0,END)
    mytxtInItW.insert(0,RTinitW)
    send_data3 = '1C' #Direction number + valueC
    ser.write(send_data3.encode())
    send_data2 = str(Number_stepinit)+'P' #Pulse number + valueP
    ser.write(send_data2.encode())
    send_data = str(Duinit)+'D' #Duration tume + valueD
    ser.write(send_data.encode())
    Degree1 = txtWR.get()
    Degree2 = 17.2 + np.arcsin (Degree1/(2*(1000000/150)*np.cos(17.2*(math.pi/180))))*(180/math.pi)
    Degree2 = round(Degree2,1)
    mytxtIRdegree.delete(0,END)
    mytxtIRdegree.insert(0,Degree2)
    DegreeRes1 = txtRes.get()
    DegreeRes2 = np.arcsin (DegreeRes1/(2*(1000000/150)*np.cos(17.2*(math.pi/180))))*(180/math.pi)
    DegreeRes2 = round(DegreeRes2,2)
    mytxtResmotor.delete(0,END)
    mytxtResmotor.insert(0,DegreeRes2)
    Nstep = (Degree2-InitialDegree2)/DegreeRes2
    Nstep = round(Nstep,0) # NUMBER of for loop
    mytxtNAS.delete(0,END)
    mytxtNAS.insert(0,Nstep)

def measurement():
    global Number_step, Du1, Nstep, DegreeRes2, RTIR, data, incidentA0, InitialDegree2, my_text0, my_text
    my_text = []
    NAvG = txtAvg.get()
    for i in range(1,int(Nstep)+1):
        send_data3 = '1C' #Direction number + valueC
        ser.write(send_data3.encode())

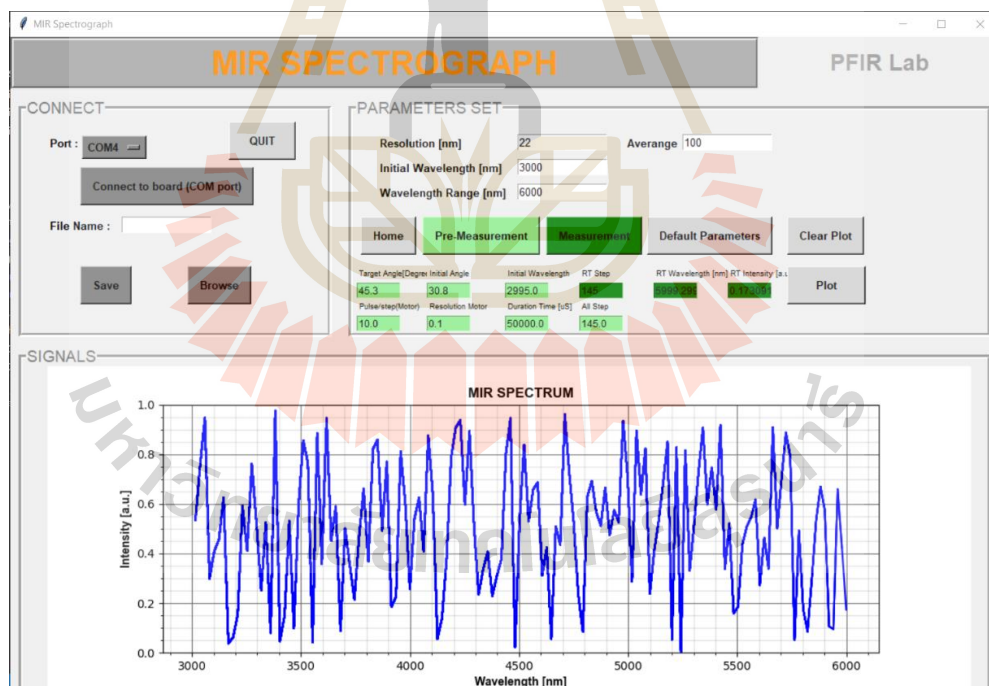
```

```

send_data2 = str(Number_step)+'P' #Pulse number + valueP
ser.write(send_data2.encode())

def home():
    send_data3h = '0C' #Direction number valueC
    ser.write(send_data3h.encode())
    txtPg = txtP.get()
    send_data2h = str(Number_step*Nstep)+'P' #Pulse number valueP
    ser.write(send_data2h.encode())
    txtDg = txtD.get()
    send_datah = str(Du1)+'D' #Duration tume valueD
    ser.write(send_datah.encode())
def default_text():
    txtRes.set("22") #Resolution motor 0.1
    txtInR.set("0")
    txtWR.set("0")
    txtAvg.set("1")

```



รูปที่ ข. 1 Graphic User Interface สำหรับระบบตรวจวิเคราะห์และประมวลผลสเปกตรัม  
ประจำความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด ด้วยภาษา Python






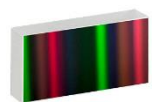



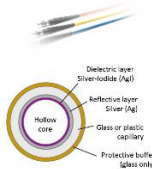
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is centered in the background. It features a stylized golden structure resembling a traditional Thai temple or a modern architectural design, with a central figure of a person sitting on a throne. Below the figure is a large, stylized golden book. The entire logo is surrounded by a decorative border of red and orange geometric shapes.

ภาคผนวก ค

ส่วนประกอบและอุปกรณ์ทางแสงสำหรับระบบเก็บสัญญาณสเปกตรัม

ย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง

ตารางที่ ค. 1 รายการส่วนประกอบและอุปกรณ์ทางแสงสำหรับระบบเก็บสัญญาณสเปกตรัมย่านอินฟราเรดของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดหลักการเลี้ยวเบนแสง

รายการ	คุณสมบัติ	จำนวน	ลักษณะ
Off-Axis Parabolic Mirror 369	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter 76.2 mm</li> <li>- Focus 152.4 mm</li> <li>- 90 degrees</li> </ul>	1	
Off-Axis Parabolic Mirror 249	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter 50.8 mm</li> <li>- Focus 101.6 mm</li> <li>- 90 degrees</li> </ul>	2	
Off-Axis Parabolic Mirror 00M9	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter 12.7 mm</li> <li>- Focus 15 mm</li> <li>- 90 degrees</li> </ul>	2	
Protected Aluminum Mirrors	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter 25.4 mm</li> <li>- 450 nm - 20 <math>\mu</math>m</li> </ul>	1	
Beam splitter BSW511 CaF <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter 25.4 mm</li> <li>- Thickness 5 mm</li> <li>- Coating 1 - 6 <math>\mu</math>m</li> </ul>	1	
Diffraction grating GR2550-30035	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 25x50x9.5 mm</li> <li>- 300 lines/mm</li> <li>- 3.5 <math>\mu</math>m Design</li> <li>- Coating 1 - 6 <math>\mu</math>m</li> </ul>	1	
Globar Light Source SLS203L/M	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabilized Globar</li> <li>- Intensity &gt;1.5 W</li> <li>- 500 - 9000 nm</li> </ul>	1	
Optical Parametric Oscillators Light Source	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tunable Wavelength</li> <li>- 2500 to 4475 nm</li> <li>- 10 ns pulse duration</li> </ul>	1	
Microbolometer MICROXCAM-384I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 384 x 288 pixel</li> <li>- 3 to 14 <math>\mu</math>m</li> <li>- uncooled detector</li> </ul>	1	
Mid-Infrared Fiber Optic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hollow core 500 <math>\mu</math>m</li> <li>- Single mode</li> <li>- 2 - 16 <math>\mu</math>m</li> </ul>	1	 <p>           Dielectric layer            Silver-hydroxide (AgH)            Reflective layer            Silver (Ag)            Hollow core            Glass or plastic capillary            Protective buffer            (Silica only)         </p>



ภาคผนวก ง

บทความและงานประชุมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความและงานประชุมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

### บทความวารสารระดับนานาชาติ

Sunongbua, P., Aekram, S., and Lertsiriyothin, W. Design of MIR Dispersive Spectrograph System with Uncooled Microbolometer. *Sensors* 2023, 23, 2205. <https://doi.org/10.3390/s23042205>

### งานประชุมวิชาการระดับชาติ

Pattarapong Sunongbua, Jintaphorn Klinsuk, Natphichon Budtri, Suwan Aekrum, Charoonsak Somphong and Weerasak Lertsiriyothin. Analysis of *Escherichia coli* Contamination on Lettuce Using Image Processing. *Agricultural Sci. J.* 2019, 50:3 (Suppl.), 256-259.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Article

# Design of MIR Dispersive Spectrograph System with Uncooled Microbolometer

Pattarapong Sunongbua, Suwan Aekram and Weerasak Lertsiriyothin \*

School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

\* Correspondence: lsrytw@g.sut.ac.th; Tel: +66-44-22-4417

**Abstract:** To make the mid-infrared (MIR) dispersive spectrograph a practical tool in industrial food processing lines, we designed a dispersive spectrograph system with an uncooled microbolometer focal plane array (FPA) detector for MIR spectral acquisition. To precisely regulate the angle of a rotatable grating to acquire the MIR spectrum, the spectral resolution and spatial resolution of the system were rigorously controlled to improve system performance. In the reflectance operation mode of the MIR dispersive spectrograph, the uncooled microbolometer FPA detector offered a maximum spectral resolution of 12 nm for the MIR, when a 300 grooves/mm blazed grating was used. Utilizing an optical parametric oscillator (OPO) pulse laser source, the wavelengths of the first-order diffraction were validated, and the system's spectral resolution limit was determined. As a line-scanning source, a Global broadband source was installed, and the USAF 1951 Resolution Calculator was used to establish the spatial resolution of the imaging spectrograph. Using NI LabView, the logical operational technique for controlling the MIR dispersive spectrograph was encoded into system firmware. The GUI and test results are thoroughly described.

**Keywords:** mid-infrared spectrograph; diffraction grating; microbolometer



**Citation:** Sunongbua, P.; Aekram, S.; Lertsiriyothin, W. Design of MIR Dispersive Spectrograph System with Uncooled Microbolometer. *Sensors* **2023**, *23*, 2205. <https://doi.org/10.3390/s23042205>

Academic Editors: Kenneth Schepler and Ajoy Kar

Received: 13 December 2022

Revised: 8 February 2023

Accepted: 13 February 2023

Published: 15 February 2023



**Copyright:** © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Infrared spectroscopy is frequently used to evaluate agricultural and food products, including in polysaccharide structure studies [1] and quality determinations of various liquid-based foods [2]. Despite the fact that mid-infrared (MIR) spectroscopy has been proven to accurately predict the adulteration of numerous foods, such as honey [3,4], and been used to monitor chemical reactions in food processing [5], the technique is still not widely used. Due to the limitations of a standard IR spectrometer, almost all testing is conducted within a micro-spot.

For the practical application of MIR spectroscopy in food processing, such as the inspection of processed foods and agricultural products [6], line scanning is a fundamental system requirement. Typically, the array, or line scanning, spectrograph requires a dispersive principle to separate the wavelengths of a broadband light source.

When a wavelength separates the infrared spectrum with a dispersive spectrograph, the diffraction grating must be rotated accurately to resolve the wavelength at the nanometer level while covering a broad MIR spectrum. As a grating function, the diffraction grating rotates in a wavelength-dependent pattern [7,8]. To obtain the complete MIR spectral range, an array dispersive spectrograph requires a comparatively large focal plane array (FPA) detector, in contrast to the visible spectral range. To capture the notoriously weak MIR absorbance or transmittance intensity, not only is a relatively large FPA required, but so is a detector with a high sensitivity. In general, photovoltaic liquid N<sub>2</sub>-cooled detectors are composed of mercury cadmium telluride (MCT) [9,10], indium antimonide (InSb) [11], or deuterated lanthanum alanine-doped triglycine sulfate (DLATGS) as a single point detector fitted in an infrared spectrometer. The practical use of an MIR spectrograph in a food

processing line is impeded by the high cost of an array of liquid N<sub>2</sub>-cooled detectors fabricated from these materials. Due to its lower sensitivity, longer response time, and lower signal-to-noise ratio (SNR), the uncooled microbolometer detector has not been routinely utilized in spectrometers or spectrographs. The uncooled microbolometer, on the other hand, does not require liquid N<sub>2</sub> cooling to maintain minimal dark noise and great signal stability, has no requirement for rare elements, and has a significantly lower price than liquid N<sub>2</sub>-cooled detectors.

Previously, microbolometers have been utilized in infrared spectrometers [12,13]. The microbolometer FPA is used for spectrograph imaging. Novel types of microbolometer FPA detectors, with relatively small pixel sizes, low Noise Equivalent Temperature Difference (NETD), and new materials have boosted the performance of essential characteristics [14,15]. These qualities offer considerable enhancements to the spectral resolution, sensitivity, and wavelength range of the spectrograph. Such spectral and spatial acquisition systems with good characteristic requirements and reasonable measurement times are currently on the market. For the infrared spectrograph system, the microbolometer is an alternative detector to the MCT and InSb detectors. To specify the limit factors for both spectral and spatial resolution, however, rigorous evidence for the successful use of an MIR dispersive spectrograph with a microbolometer is still necessary.

For the design of a bespoke system, employing optomechanical technologies, an optical system was controlled by an NI LabView virtual instrument system. Controlling the revolving grating necessitated the creation of an NI LabView-controlled virtual instrument [16,17]. Using the virtual equipment, for instance, the Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy system [18] and the High-Performance Liquid Chromatography Lab [19] were successfully controlled.

The purpose of this study is to construct an MIR dispersive spectrograph equipped with a microbolometer FPA detector to identify the key constraints of spectrum acquisition, namely, spectral resolution, spatial resolution, and operating speed. These parameters are incredibly useful for developing firmware for a high-resolution and dependable dispersive spectrograph with a microbolometer detector. Here, the microbolometer FPA (35 μm pixel size) is utilized as a detector of the dispersive spectrograph, yielding different wavelengths of the first-order diffraction, and spatial positions distinguishable from the array data. The MIR dispersive spectrograph system's measurement time is shortened. The signal resolution of the MIR dispersive spectrograph system is thereby improved. An optical parametric oscillator (OPO) pulse laser source was utilized to confirm unique wavelengths diffracted at any angle and to define a signal for a diffracted wavelength. The upper limit of the spectral resolution within the MIR spectrum was firmly determined. In addition, the spatial resolution of the spectrograph was determined using the USAF 1951 Resolution Calculator (Edmund Scientific). To confirm the correctness of the diffraction wavelength and optical resolution, a line scan test was conducted using an IR standard polystyrene film.

## 2. Configuration of the System

### 2.1. Optical Design

The Czerny–Turner spectrograph inspired the development of an MIR dispersive spectrograph system. When light enters the entrance slit, the amount of light reflected from the sample is determined. Collimation of the reflection light is performed to collect both specular and diffuse reflectance light from the non-shining organic sample to enhance the energy beam entering the spectrograph, where the beam is collimated with an off-axis parabolic (OAP) mirror before being reflected into the diffraction grating.

Figure 1a depicts the MIR dispersive spectrograph system's design. An illumination system, composed of a stabilized global light source (500 to 9000 nm, Thorlabs, Newton, NJ, USA) and OPO pulse laser source (NT200 Series, Ekspla, Vilnius, Lithuania), emits in the MIR spectral range through OAP4 to focus a beam onto the sample. The reflection light from the sample is collected by OAP6 and focused by OAP7 into the spectrograph's entrance slit. The MIR dispersive spectrograph is composed of an OAP mirror, a diffraction



grating, and an uncooled vanadium oxide (VOx) microbolometer FPA detector (3–14  $\mu\text{m}$ ) with a focusing lens (INO, Microxcam 384).

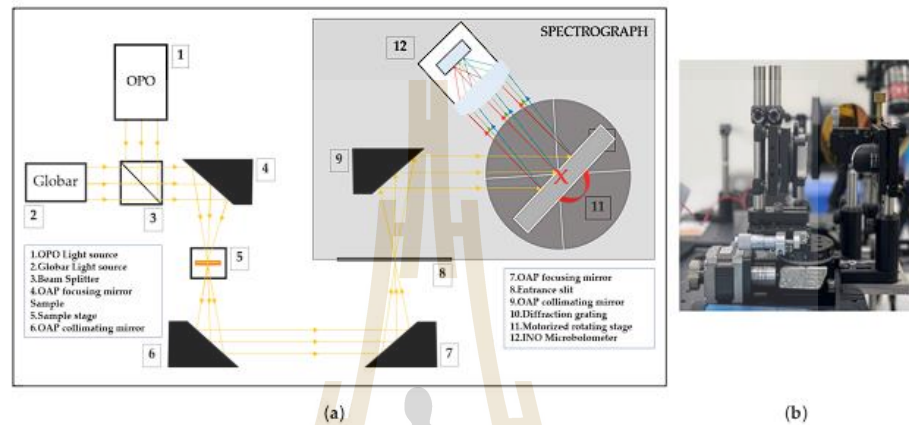


Figure 1. (a) The mid-infrared (MIR) dispersive spectrograph system. (b) The rotating diffraction grating with a motorized rotating stage system.

In the optical wavelength separation system, the MIR wavelength is diffracted using a reflection grating. The common groove surface of the MIR reflection grating has 150 to 300 grooves per millimeter and is covered with highly reflective aluminum. The diffraction wavelength depends on the incidence and diffracted angles of light from the grating facet, as described by the grating function, Equation (1), where  $d$  is the blazing spacing,  $\alpha$  is the incidence angle of the light relative to the grating normal, and  $\beta$  is the diffraction angle of the light at the  $m^{\text{th}}$ -order of diffraction light.

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

As illustrated in Figure 1b, a rotating diffraction grating system consists of (1) a motorized rotating stage with a stepper motor, (2) a linear stage, and (3) a diffraction grating (300 grooves/mm, GR2550-30035, Thorlabs) with a mounting plate. Mounting a diffraction grating on a linear stage, with the center of the grating surface aligned with the rotation center of the motorized rotating stage, stabilizes the incidence and reflected angles as the grating is revolved. A microbolometer FPA detector with an infrared focusing lens collects the dispersive spectral signal. Utilizing a focusing lens with a high infrared transmission rate maximizes the low intensity of the MIR energy and focuses the collimated beam onto the micropixel of the microbolometer detector. The motorized rotating stage is electronically controlled by a stepping motor controller to provide the necessary rotation for measurement. NI LabView is used to program the system's operational software to regulate and acquire the infrared spectral signals.

## 2.2. Programming Method

Figure 2 depicts the algorithm for controlling the MIR dispersive spectrograph system to measure spectral wavelength signals. As shown in Figure 3, the zero-order diffraction angle ( $\alpha = -\beta$ ) position was first tuned as a reference angle for the clockwise rotation of the diffraction grating to a specified angle, corresponding to the predetermined first-order diffraction wavelength. However, the rotation angle continues to be constrained by a parallel line between the incident light and the grating facet.

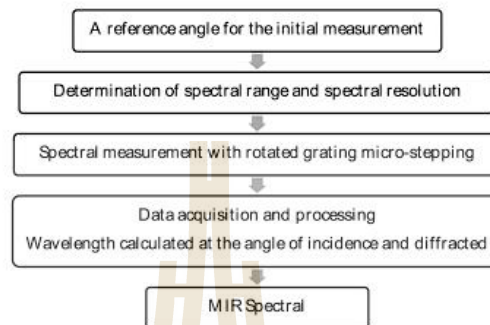


Figure 2. The schematic diagram for controlling the MIR dispersive spectrograph.

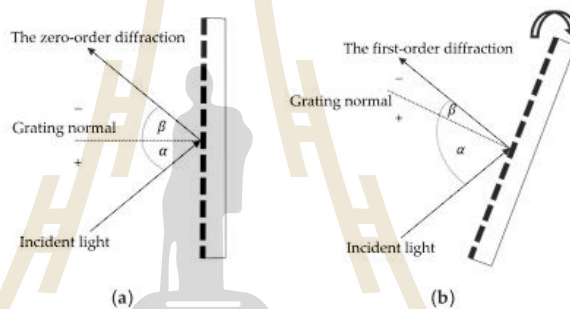


Figure 3. The reflection angle of (a) the zero-order diffraction and (b) the first-order diffraction with rotated grating.

To acquire a precise wavelength resolution (e.g., 100 nm), it is crucial to determine the rotation angle step of the diffraction grating; consequently, a stable rotating angle of the diffraction grating is essential. Using the diffraction grating equation and the reference position of the zero-order diffraction, as shown in Equation (2), the rotation angle of the diffraction grating is calculated. The rotation angle of a diffraction grating is computed based on the difference between the target wavelength ( $\lambda_n$ ) at the  $m_n$ -order diffraction and the wavelength ( $\lambda_0$ ) at the zero-order diffraction ( $m_0 = 0$ ).

$$m_n \lambda_n - m_0 \lambda_0 = d(\sin \alpha_n + \sin \beta_n) - d(\sin \alpha_0 + \sin \beta_0) \quad (2)$$

In the case of the first-order diffraction ( $m_n = 1$ ), the target wavelength equation can be rearranged mathematically as follows:

$$\frac{\lambda_n}{d} = 2 \cos\left(\frac{\alpha_n + \alpha_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha_n - \alpha_0}{2}\right) + 2 \cos\left(\frac{\beta_n + \beta_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\beta_n - \beta_0}{2}\right) \quad (3)$$

When a microbolometer FPA is fixed in place and a diffraction grating is rotated, the incident and diffraction angle differences for the zero- and first-order diffractions are equal. As a result, the incident angle of the first-order diffraction can be replaced with that of the reference zero-order diffraction, as shown below:

$$\alpha_1 - \beta_1 = \alpha_0 - \beta_0 \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \sin^{-1} \left( \frac{\lambda_1}{2d \cos \alpha_0} \right) \quad (5)$$

Equation (5) was utilized to determine the precise incident angle required to achieve any desired spectral wavelength. This equation was incorporated into the algorithm for controlling the grating position in order to achieve any user-specified diffraction wavelength.

### 2.3. Program for Rotating Motorized Stage

The diffraction grating is mounted on a motorized rotating stage with a 1:90 motor ratio and a step angle of 1.8 degrees per step, which is controlled by a pulse signal (in one period, one pulse causes the stepping motor to rotate by one step). We use the Arduino board and the micro-stepper driver to control the rotation angle of the motorized rotating stage, by adjusting the frequency and duration of the pulse signal.

Figure 4 illustrates the algorithm for calculating the pulse signal used to control the rotation of the motorized rotating stage. The wavelength resolution limit is used to calculate the step size and angle of the motorized stage, whereas the wavelength of interest specifies the position angle. The number of pulse signal steps is computed on the basis of the position angle, step size, and step angle from Equation (6).

$$\text{Number of Steps} = \frac{\text{Position Angle}}{\text{Step Angle} \times \text{Step Size}} \quad (6)$$

where the Number of Steps is the number of pulses in the pulse signal, Position Angle is the desired angle of rotation for the stepper motor in degrees, Step Angle is the angle of rotation of the stepper motor in one pulse [Full Step = 1.8 degree/pulse], and Step Size is the resolution of rotation in each pulse [Full step=1]. For the duration of the pulse signal, the frequency and number of steps for controlling the rotation of the diffraction grating were then determined.

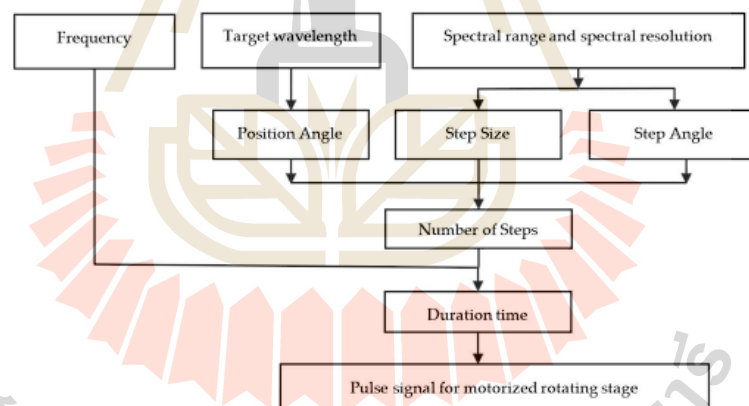
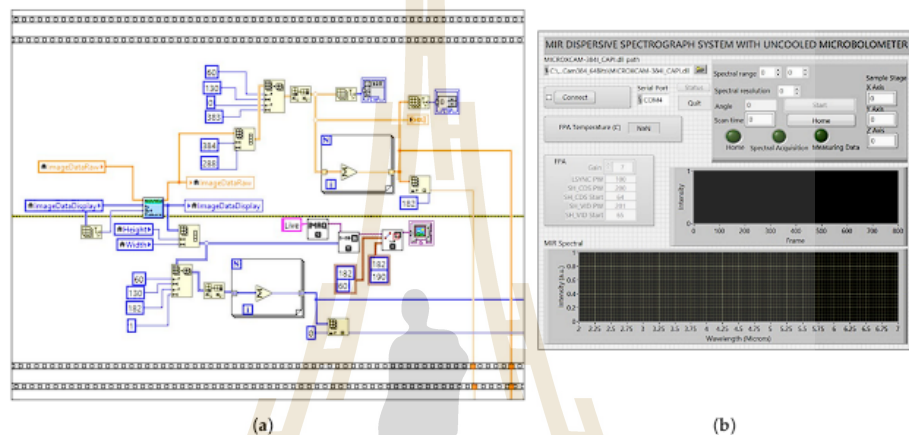


Figure 4. The flowchart diagram for controlling the stepper motor of the motorized rotating stage.

### 2.4. Data Acquisition and Processing

The diffraction signal from a reflection grating was detected by a focusing lens-equipped microbolometer FPA detector. A Gigabit Ethernet Link was utilized for communication between the microbolometer FPA detector and a computer. Figure 5a depicts the LabView VI system. The block diagram is utilized to acquire an image from the microbolometer FPA. It provides a 16-bit intensity raw signal for a pixel. The IMAQ was used to acquire the signal and display the spectral signal on the graphical user interface. The

wavelength was determined by applying Equation (5) to the formula node sub VI, where the input of the formula node is a rotating angle of the diffraction grating (angle of incidence and diffraction). Then, we used a for-loop to correlate a change in the rotation angle of the diffraction grating with the corresponding wavelength (each incremental counter of the for-loop is equivalent to one rotating step), ensuring that precise mapping of each pixel with the correct MIR spectral wavelength was acquired.



**Figure 5.** (a) NI LabView VI system for mapping an MIR signal from a microbolometer focal plane array (FPA) detector (b) Graphical user interface for MIR dispersive spectrograph.

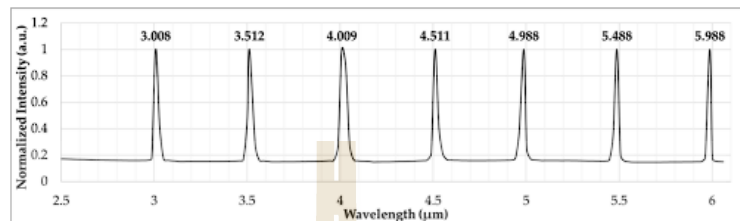
As illustrated in Figure 5b, an operation of the MIR dispersive spectrograph can be carried out via a firmware interface with the LabView GUI program. Before performing any measurement, firstly, the user presses the home button to find the zero-order diffraction position. The system will automatically locate the maximum intensity to determine the zero-order diffraction position. Users can also adjust the resolution of the rotation diffraction grating to measure the signal. A real-time spectral signal that maps the signal to its wavelength is depicted in the graph. Starting at the reference rotation angle (the zero-order diffraction), the wavelength is determined based on the angle of the incident and diffracted light. The infrared spectral data can be saved as a .txt file or an .xls file, with the spectral intensity of the wavelength (y-axis), plotted versus wavelength, incidence angle, and diffracted angle (x-axis).

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Spectral Characteristics

The MIR dispersive spectrograph is constructed according to the Czerny–Turner principle [20,21], and an uncooled microbolometer FPA detector is utilized to detect dispersive infrared spectral signals, with rotating gratings at angles corresponding to Equation (5). The optical alignment of the MIR dispersive spectrograph produces the reference position of the zero-order diffraction at an incident angle of 14.5 degrees and a diffraction angle of  $-14.5$  degrees. To validate the spectral diffraction signals of the system, the diffraction wavelength validation method employs a tuneable OPO pulse laser source. As shown in Figure 6, the first-order diffraction signals from a ruled reflective diffraction grating (design wavelength of  $3.5 \mu\text{m}$ ) were acquired from 3 to  $6 \mu\text{m}$ , with an incremental wavelength of  $0.5 \mu\text{m}$ . Compared to the OPO laser, the MIR dispersive spectrograph provided a wavelength of the first-order diffraction infrared signal with a maximum error of 0.007 percent.

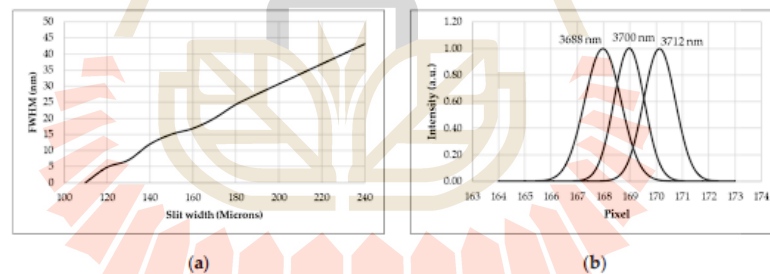




**Figure 6.** Wavelength validation of the first-order diffraction spectral acquired by the MIR dispersive spectrograph with an optical parametric oscillator (OPO) pulse laser source for the wavelength range of 3 to 6  $\mu\text{m}$ .

Since the MIR wavelength is a long wavelength region, overlapping spectra between the first-order and second-order diffraction are nearly impossible for a ruled grating with a 26.5-degree blaze angle. With a relatively intense OPO pulse laser, the second-order diffraction of 3  $\mu\text{m}$  appeared on the same pixel as the first-order diffraction of 6  $\mu\text{m}$ , but with much less intensity. This suggests that the MIR dispersive spectrograph, when equipped with a typical broadband global light source, generates a signal of negligible second-order diffraction. Therefore, it offers a free spectral range within the wavelength range specified by the grating.

Figure 7 depicts the diffraction signal characteristic of the MIR dispersive spectrograph system. The full width at half-maximum (FWHM) of the diffraction signal has a substantial influence on the spectral resolution of any dispersive spectrograph [21]. Figure 7a demonstrates that the FWHM of the first-order diffraction signal acquired by our system is 30 nm for a slit width of 200  $\mu\text{m}$ . Positive linearity was observed in the FWHM derivative as a function of slit width, resulting in a reduction in the system's spectral resolution for wider slit widths.



**Figure 7.** (a) The relationship between the FWHM and the width of the entrance slit (b) Spectral resolution of the system with a central wavelength of 3700 nm.

By varying the wavelength of the OPO laser around its central wavelength, the spectral resolution of the system was analyzed. Since each wavelength's energy falls on distinct pixels of the microbolometer FPA, the closest separable spectral wavelength can be identified. As shown in Figure 7b, the central wavelength was set to 3700 nm, and the OPO laser wavelength was adjusted by 1 nanometer around the central wavelength. The system's resolution is 12 nm/pixel at 3700 nm with a slit width of 140  $\mu\text{m}$  due to the resolving spectra. For a grating with 300 grooves/mm, the system's angular dispersion is 107.43 nm/degree. Notably, an MIR dispersive spectrograph with a microbolometer FPA should not have an excessively narrow slit, as the weak energy intensity of a typical global

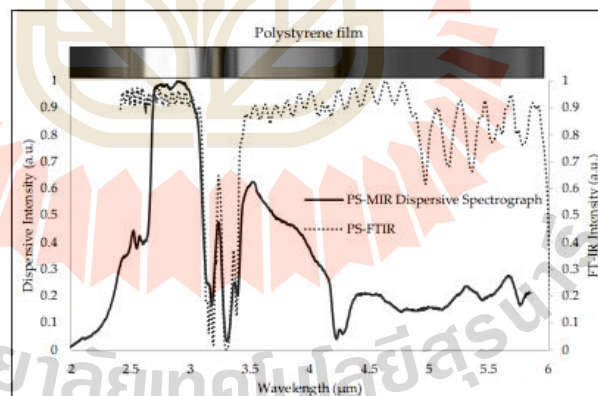


broadband light source would not be detectable, and the system's sensitivity would be significantly diminished.

Even though an MIR diffraction grating mounted on a rotating motorized stage with a micro stepper motor can be tuned to a precise angle, the MIR diffraction grating's resolving power limits the fine rotational step angle of a diffraction grating intended to enhance spectral resolution. With a maximum spectral resolution of 12 nm, the system requires 4.5 s to acquire 1  $\mu\text{m}$  of the mid-infrared spectrum over a sample length of 10 mm. The maximum spectral resolution of our system is comparable to that of other MIR dispersive spectrometers equipped with MCT detectors, whose spectral resolutions range from 40 to 65 nm, with slit widths ranging from 108 to 153  $\mu\text{m}$  [9].

According to the free spectral range and the spectral resolution, the MIR dispersive spectrograph can collect the MIR signal in the wavelength range of 3 to 6  $\mu\text{m}$  with a single diffraction grating. To cover the full MIR spectrum and improve the spectral resolution, the installation of a double diffraction grating with other grating blaze angles or groove/mm would fulfill the requirements [22].

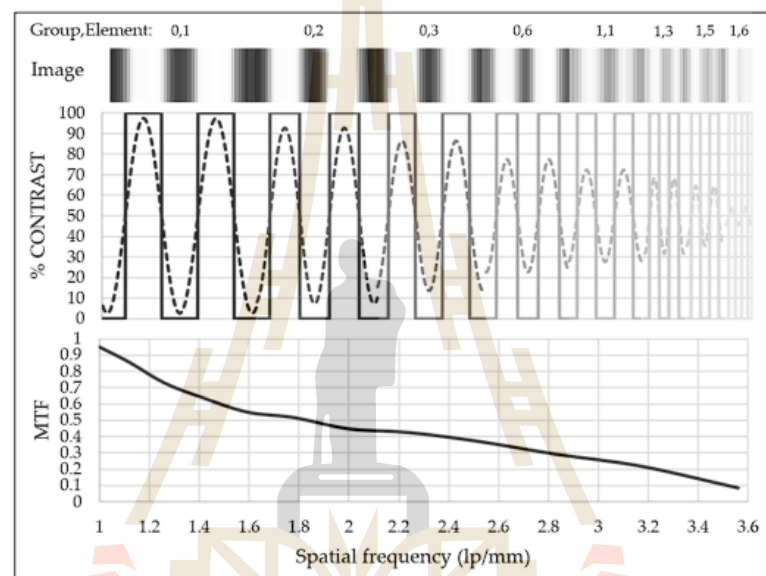
The reliability of the MIR spectral signal acquired by the MIR dispersive spectrograph system was proved by measuring spectrometer calibration polystyrene film (Mid Infrared certified wavelength standard SN:2809, Brucker Optics) [9–11] and switching to a global light source, following spectral validation with an OPO pulse laser source. As the primary illumination source, a global light source was installed in the MIR dispersive spectrograph. Figure 8 depicts the MIR spectral profile (2–6  $\mu\text{m}$ ) of the standard polystyrene (PS) film, measured at 20  $^{\circ}\text{C}$  room temperature. The major absorption peaks of PS were between 3 and 3.5  $\mu\text{m}$ , which corresponded well with the location of its standard MIR spectral profile as measured by an FTIR spectrometer with a resolution of 8  $\text{cm}^{-1}$ . The limitation of the microbolometer with a focusing lens, which the manufacturer claims detects well at wavelengths above 3  $\mu\text{m}$ , and the grating efficiency of "3.5  $\mu\text{m}$  Design Wavelength Reflective Diffraction Gratings" led to a low intensity in the wavelength range of 2 to about 2.7  $\mu\text{m}$ . At the same time, the low intensity for wavelengths greater than 4.5  $\mu\text{m}$  pertained to the Spectral Power of the SLS203L Stabilized Global Light Source. In addition, the effect of  $\text{CO}_2$  gas in ambient air was perceivable at wavelengths close to 4.2  $\mu\text{m}$  [23]. Moreover, when a Global light source oriented along the y-axis was employed, the spatial signal of the sample was of high spectral quality.



**Figure 8.** The transmittance spectral profiles of the MIR-certified wavelength standard polystyrene film acquired by the MIR dispersive spectrograph and FTIR.

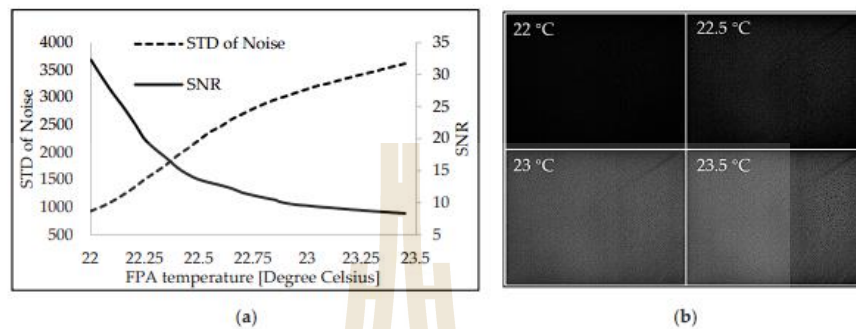
### 3.2. Spatial Resolution

A microbolometer FPA installation in an MIR dispersive spectrograph enables the measurement of signals from the x-axis and y-axis pixels of the FPA, thereby enabling 2D imaging of the sample. The horizontal pixel (x-axis) identifies wavelength, whereas the vertical pixel (y-axis) designates line-spatial. The USAF 1951 Resolution Calculator was utilized to calibrate the line-spatial resolution limit [24]. Signals from three vertical elements are compared to determine the spatial configuration of the y-axis. As shown in Figure 9, the width and spacing of each vertical element signal were in accordance.



**Figure 9.** The image of USAF 1951 Resolution Calculator group 0 and 1 with elements 1 to 6 on the y-axis pixel of the microbolometer FPA with the corresponding % contrast of both a bar target pattern (-) and image pattern (-) and the spatial resolution of the spectrograph by the modulation transfer function (MTF) with the spatial frequency.

At a spatial frequency of less than two line pairs per millimeter (lp/mm), the modulation transfer function (MTF), or contrast clear separation, was experimentally demonstrated using group numbers zero to one and elements one to six of the USAF. The MTF values indicated that the system has a spatial resolution limit of 3.5 lp/mm, which is equivalent to 140  $\mu\text{m}$  of the element; consequently, this parameter was determined for an incremental step size for a 2D scan of the array imaging spectrograph. Figure 10 is an example of a 2D image acquired by the MIR dispersive spectrograph of the USAF 1951. According to the 300 mm working distance of the MIR focusing lens, the FPA microbolometer cannot be positioned any closer to the diffraction grating. The spatial resolution is subsequently constrained because the detector cannot be moved closer, to increase the MTF.



**Figure 10.** Effect of the FPA temperature of the microbolometer FPA operating at room temperature on (a) the standard deviation of the background noise and the signal-to-noise ratio (SNR). (b) Images of the background noise at three operating temperatures.

### 3.3. Signal-To-Noise Ratio

Since the microbolometer FPA utilized here is an uncooled thermal detector, vanadium oxide was used to create it [14,15]. During continuous measurement of the spectral signal for a slow rotating speed of the diffraction grating, it is necessary to account for the heat-sensitive nature of the thermal detector, which contributes to the rise in the FPA's temperature. To determine the actual performance of the detector, the SNR of the first-order diffraction signal was calculated using the SNR value or contrast-to-noise ratio, as shown in Equation (7) [25,26].

$$\text{SNR} = \frac{|\mu_s - \mu_N|}{\sigma_N} \quad (7)$$

The SNR is the absolute value of the difference between the average signal intensity ( $\mu_s$ ) and the background noise ( $\mu_N$ ) divided by the standard deviation of the background noise ( $\sigma_N$ ). With an entrance slit width of 140  $\mu\text{m}$  and an integration time of 20 milliseconds, the MIR dispersive spectrograph was validated. Figure 10a demonstrates that the standard deviation in the background noise recorded by the microbolometer FPA detector increased nonlinearly with a small change in the FPA's temperature (approximately 1.5 degrees Celsius), while the SNR of the system rapidly decreased. Figure 10b reveals, however, that the background image of the noise signal was undetectable when the FPA temperature was brought down to 22 °C or lower.

In addition, it is simple to maintain a relatively constant temperature of the system's uncooled microbolometer, by operating it in a room cooled by air conditioning, to obtain a signal with high spectral quality.

The significant parameters of the MIR dispersive spectrograph are summarized in Table 1.

**Table 1.** Compilation of parameters of the MIR dispersive spectrograph.

Parameters	Values
Spectral range	2–6 $\mu\text{m}$
Disperser	300 grooves/mm grating
Detector type	Uncooled microbolometer VOx
Detector size	35 $\mu\text{m}$ pixel pitch
Spectral resolution	12 nm/pixel at 3700 nm
Scan time	4.5 s/ $\mu\text{m}$ for 10 mm spatial length
Spatial resolution	3.5 lp/mm or 140 $\mu\text{m}$
Signal-to-noise ratio	32 (SNR, operated at 20 °C)



#### 4. Conclusions

In this paper, an MIR dispersive spectrograph system, equipped with an uncooled microbolometer FPA detector, was developed to evaluate all of the parameters that play a significant role in the MIR spectral acquisition. The system was constructed and tested, and found to function effectively with non-specular reflectance samples. The spatial resolution was limited to 3.5 lp/mm, or 140  $\mu\text{m}$ , while the spectral resolution was confined to 12 nm/pixel. With a double grating turret installation, the MIR dispersive spectrograph can acquire the full spectrum of the MIR. The MIR thermal detector platform operating at 20 °C room temperature has acceptable SNR values for use in the MIR dispersive spectrograph. This detector core also supports line spatial, allowing it to be utilized in MIR line-scanning applications. For user-friendly operation, a LabView-based graphical user interface, that considers all parameter limits, was developed as system firmware. Adjustable parameters include the spectral range, spectral resolution, and region of interest.

**Author Contributions:** Conceptualization, W.L.; methodology, P.S.; software, P.S.; validation, W.L., P.S. and S.A.; formal analysis, P.S.; investigation, W.L.; resources, S.A.; data curation, S.A.; writing—original draft preparation, P.S.; writing—review and editing, W.L.; visualization, P.S.; supervision, W.L.; project administration, W.L.; funding acquisition, W.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This work was supported by the Suranaree University of Technology. Research grants included the National Science, Research, and Innovation Fund (NSRF) (NRIS project code: 160362) under Thailand Science Research and Innovation (TSRI) and the Agricultural Research Development Agency (ARDA contract code: PR6005021270).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

**Acknowledgments:** The authors acknowledge Panomsak Meemon for supporting the optical design software and Pat Photongkam for providing the optical sensor.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

#### References

- Hong, T.; Yin, J.; Nie, S.P.; Xie, M.Y. Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective. *Food Chem. X* **2021**, *12*, 100168. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Su, W.H.; Sun, D.W. MIR Spectroscopy for Quality Analysis of Liquid Foods. *Food Eng. Rev.* **2019**, *11*, 142–158. [[CrossRef](#)]
- Mendes, E.; Duarte, N. MIR Spectroscopy as a Valuable Tool to Tackle Food Analysis: A Literature Review on Coffee, Dairies, Honey, Olive Oil and Wine. *Foods* **2021**, *10*, 477. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Dumancas, G.; Ellis, H.; Neumann, J.; Smith, K. Comparison of Various Signal Processing Techniques and Spectral Regions for the Direct Determination of Syrup Adulterants in Honey Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Chemometrics. *Chemosensors* **2022**, *10*, 51. [[CrossRef](#)]
- Hashimoto, A.; Kameoka, T. Applications of Infrared Spectroscopy to Biochemical, Food, and Agricultural Processes. *Appl. Spectrosc. Rev.* **2008**, *43*, 416–451. [[CrossRef](#)]
- Qin, J.; Kim, M.S.; Chao, K.; Chan, D.E.; Delwiche, S.R.; Cho, B.-K. Line-Scan Hyperspectral Imaging Techniques for Food Safety and Quality Applications. *Appl. Sci.* **2017**, *7*, 125. [[CrossRef](#)]
- Mohazzabi, B.; Mattson, D.J.; Ponce, J.A., Jr. Diffraction Pattern of a Rotated Grating. *J. Appl. Math. Phys.* **2019**, *07*, 1870–1876. [[CrossRef](#)]
- Huang, J.; Wen, Q.; Nie, Q.; Chang, F.; Zhou, Y.; Wen, Z. Miniaturized NIR spectrometer based on novel MOEMS scanning tilted grating. *Micromachines* **2018**, *9*, 478. [[CrossRef](#)]
- Lanzarotta, A.; Marcott, C.; Story, G.; Dowrey, A.; Sommer, A. Infrared Microspectroscopy Using Prism-Based Spectrographs and Focal Plane Array Detection. *Appl. Spectrosc.* **2012**, *66*, 304–311. [[CrossRef](#)]
- Pellerin, C.; Snively, C.M.; Chase, D.B.; Rabolt, J.F. Performance and application of a new planar array infrared spectrograph operating in the MIR (2000–975  $\text{cm}^{-1}$ ) fingerprint region. *Appl. Spectrosc.* **2004**, *58*, 639–646. [[CrossRef](#)]
- Elmore, D.; Tsao, M.W.; Frisk, S.; Chase, D.; Rabolt, J. Design and Performance of a Planar Array Infrared Spectrograph That Operates in the 3400 to 2000  $\text{cm}^{-1}$  Region. *Appl. Spectrosc.* **2002**, *56*, 145–149. [[CrossRef](#)]

12. William, R.J.; Simon, J.H.; Steven, M. Microbolometer imaging spectrometer. *Opt. Lett.* **2012**, *37*, 803–805. [[CrossRef](#)]
13. Leijtens, J.; Helden, W.; Breussin, F.; Smorenburg, C.; Escudero, I.; Boslooper, E.; Visser, H. Microbolometer spectrometer opens hoist of new applications. In Proceedings of the International Conference on Space Optics, Toulouse, France, 21 November 2017. [[CrossRef](#)]
14. Fisette, B.; Tremblay, M.; Oulachgar, H.; G n reux, F.; Béland, D.; Beaupre, P.; Julien, C.; Gay, D.; Deshaies, S.; Terroux, M.; et al. Novel vacuum packaged 384 × 288 broadband bolometer FPA with enhanced absorption in 3–14 μm wavelength. *Proc. SPIE* **2017**, *101771*, 407–421. [[CrossRef](#)]
15. Fisette, B.; G n reux, F.; Béland, D.; Topart, P.; Tremblay, M.; Desroches, Y.; Terroux, M.; Marchese, L.; Proulx, C.; Picard, F.; et al. Customized packaged bolometers in niche applications at INO. *Proc. SPIE* **2018**, *10656*, 79–97. [[CrossRef](#)]
16. Sánchez-Alvarez, A.; Luna-Moreno, D.; Hernández-Morales, J.A.; Zaragoza-Zambrano, J.O.; Castillo-Guerrero, D.H. Control of Stepper Motor Rotary Stages applied to optical sensing technique using LabView. *Optik* **2018**, *164*, 65–71. [[CrossRef](#)]
17. Wang, S.; Han, H.; Gao, K.; Wang, Z.; Zhang, C.; Yang, M.; Wu, Z.; Wu, Z. A user-friendly LabVIEW software platform for grating based X-ray phase-contrast imaging. *J. X-ray Sci. Technol.* **2015**, *23*, 189–199. [[CrossRef](#)]
18. Wu, Q.; Wang, L.; Zu, L. A LabVIEW-Based Virtual Instrument System for Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy. *J. Autom. Methods Manag. Chem.* **2011**, *2011*, 457156. [[CrossRef](#)]
19. Beussman, D.; Walters, J. Complete LabVIEW-Controlled HPLC Lab: An advanced undergraduate experience. *J. Chem. Educ.* **2017**, *94*, 1527–1532. [[CrossRef](#)]
20. Robert, D.G.; Duncan, G.S. *Encyclopedia of Modern Optics*, 2nd ed.; Elsevier Academic Press: Cambridge, MA, USA; University of California: Los Angeles, CA, USA, 2005; pp. 845–857.
21. Palmer, C.; Loewen, E. *Diffraction Grating Handbook*, 8th ed.; Newport Corporation: Irvine, CA, USA, 2020; pp. 76–236.
22. Wang, Q.; Shen, H.; Liu, W.; Dai, P. A High-Resolution MIR Echelle Grating Spectrometer with a Three-Mirror Anastigmatic System. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 8013. [[CrossRef](#)]
23. Floria, O.B.; Carlos, E.H.; Henrik, R.; Hans, M.; Hans, S.; Kristinn, B.G. Carbon dioxide absorption spectroscopy with a MIR silicon photonic waveguide. *Opt. Lett.* **2020**, *45*, 109–112. [[CrossRef](#)]
24. Peter, L.; Dieter, N. Spatial resolution in infrared microspectroscopic imaging of tissues. *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Biomembr.* **2006**, *1758*, 814–829. [[CrossRef](#)]
25. Deane, S.; Avdelidis, N.P.; Ibarra-Castanedo, C.; Zhang, H.; Nezhad, H.Y.; Williamson, A.A.; Mackley, T.; Maldague, X.; Tsourdos, A.; Nooralishahi, P. Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites. *Sensors* **2020**, *20*, 3381. [[CrossRef](#)]
26. Usamentiaga, R.; Ibarra-Castanedo, C.; Maldague, X.P. More than Fifty Shades of Grey: Quantitative Characterization of Defects and Interpretation Using SNR and CNR. *J. Nondestruct. Eval.* **2018**, *37*, 25. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



การตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของ *Escherichia coli* บนผักกาดหอมด้วยวิธีการประมวลผลภาพ  
Analysis of *Escherichia coli* Contamination on Lettuce Using Image Processing

ภัทรพงษ์ สุหนองบัว<sup>1</sup> จินตพร กลิ่นสุข<sup>1</sup> นัฐพิชชน บุตรี<sup>1</sup> สุวรรณ เอกรัมย์<sup>1</sup> จรูญศักดิ์ สมพงษ์<sup>1</sup> และ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน<sup>1</sup>  
Pattarapong Sunongbua<sup>1</sup>, Jintaphorn Klinsuk<sup>1</sup>, Natphichon Budtri<sup>1</sup>, Suwan Aekrum<sup>1</sup>, Charoonsak Somphong<sup>1</sup>  
and Weerasak Letsiriyothin<sup>1</sup>

Abstract

The contamination of pathogen on food and postharvest agricultural products often causes of danger for consumers. This research aims to develop a fast screening method for detection of pathogen contamination area on lettuce using image processing. Lettuce leaf surface was washed with surfactant and inoculated by drops of *Escherichia coli* (*E. coli*) solution (ca.  $2.7 \times 10^9$  CFU.ml<sup>-1</sup>). Each inoculation drop area contained a number of *E. coli* which was equivalent to  $1.1 \times 10^3$  CFU.ml<sup>-1</sup>. pixel<sup>-1</sup>. All samples were stored at 8 °C. Then the production of biofilm or adhesion structure of microorganisms on the leaf surface was investigated based on image of the stained sample. Emissive light of the specific wavelength at 620±10 nm as a result of PI fluorescence staining solution with *E. coli* was able to capture by a digital single-lens reflex (DSLR) camera fitted with a long pass filter at a wavelength of more than 530 nm. The reflectance spectra showed clearly absorption band at 620±10 nm which responded for the biofilm of *E. coli* contamination. Moreover, it corresponded to results of confocal laser scanning microscope (CLSM) method. The image of contamination area on lettuce leaf was related to the incremental number of *E. coli* about  $1.3 \times 10^5$  CFU.ml<sup>-1</sup> after It was inoculated for 5 days.

**Keywords:** *Escherichia coli*, contamination, image processing

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารและผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว หากบริโภคเข้าไปอาจส่งผลทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบการแพร่กระจายของการปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรคบนผักกาดหอมด้วยวิธีการประมวลผลภาพถ่าย โดยนำใบผักกาดหอมล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวและหยดเชื้อ *E. coli* ปริมาณ  $2.7 \times 10^9$  CFU.ml<sup>-1</sup> ลงบนใบผักกาดหอม โดยแต่ละฟลักเซลมีจำนวนเชื้อ *E. coli*  $1.1 \times 10^3$  CFU.ml<sup>-1</sup>. pixel<sup>-1</sup> และเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ซึ่งก่อให้เกิดไบโอฟิล์มหรือโครงสร้างยึดเกาะกับพื้นผิวที่ถูกสร้างโดยกลุ่มของจุลินทรีย์ที่อยู่รวมกันบนใบผักกาดหอม จากนั้นจึงตรวจสอบโดยใช้ค่าสเปกตรัมของการสะท้อนภาพด้วยสียภาพได้สภาวะความยาวคลื่นแสงที่กระตุ้นการตอบสนองของเชื้อที่ย้อมด้วยสารละลาย PI ด้วยการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 620±10 นาโนเมตร โดยแสงที่เปล่งออกมานั้นจะถูกถ่ายด้วยกล้อง DSLR ผ่านเลนส์ที่กรองด้วยฟิลเตอร์ในช่วงความยาวคลื่นสูงกว่า 530 นาโนเมตรสามารถทำได้ จึงทำให้ค่าของสเปกตรัมการสะท้อนที่ได้จากภาพถ่ายแต่ละฟลักเซลมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620±10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ไบโอฟิล์มของ *E. coli* เปล่งแสงสะท้อนซึ่งเดียวกันกับการตรวจสอบด้วยวิธี CLSM และพบว่าพื้นที่การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* บนผักกาดหอมหลังจากการหยดเชื้อ 5 วัน เพิ่มขึ้นถึง  $1.3 \times 10^5$  CFU.ml<sup>-1</sup>

**คำสำคัญ:** *Escherichia coli* การปนเปื้อน การประมวลผลภาพ

คำนำ

ผักเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามิน ธาตุเหล็ก และเส้นใยต่างๆ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันการบริโภคผักเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในหมู่ผู้บริโภคโดยเฉพาะการบริโภคผักสด เช่น การบริโภคพร้อมสลัดหรือการบริโภคโดยตรง เป็นต้น ซึ่งผักสดที่ใช้ในการบริโภคนั้นไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนจึงอาจส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีและจุลินทรีย์ก่อโรคที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ เช่น การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* เป็นต้น นอกจากนี้ในการส่งออกผักสดมีการตรวจพบการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในผักสดโดยประเทศผู้นำเข้าที่มีค่าการปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานอาจส่งผลทำให้เกิด

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000



ปัญหาการส่งออกที่ชะงักงันได้ ดังนั้นเพื่อการบริโภคผักสดที่มีความสะอาดและปลอดภัย การตรวจสอบการปนเปื้อนของ จุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารและผลิตภัณฑ์เกษตรหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญ เนื่องด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพนั้น สามารถประเมินการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนผักได้ในบริเวณที่กว้าง ลดการสัมผัสกับตัวอย่างและมีความรวดเร็วในการ ประมวลผล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจสอบการปนเปื้อน *E. coli* บนผักกาดหอมและการ ตรวจสอบการแพร่กระจายของการปนเปื้อนด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 1. การเตรียมผักกาดหอม

นำผักกาดหอมจากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มาล้างทำความสะอาด จากนั้นจุ่มลงในสารละลายตั้งสีผิว (Latron CS-7 100 ความเข้มข้น 100 ppm) เพื่อลดแรงตึงผิวบนใบและเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะของจุลินทรีย์ จากนั้นหยด *E. coli* (*Escherichia Coli* TISTR 527 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปริมาณ  $2.7 \times 10^9$  [CFU.ml<sup>-1</sup>] ลงบนใบผัก เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส บันทึกการเปลี่ยนแปลงทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 วัน เพื่อประเมินระดับความเสียหาย ของผักอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ จากนั้นเมื่อผักเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ นำมาล้างด้วยน้ำ DI sterile จำนวน 3 ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้น้ำแห้ง และหยดสารย้อม PI (propidium iodide excitation/emission ที่ 533-617 nm) ลงไปบริเวณที่มีคราบ จำนวน 10 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีที่อุณหภูมิห้องโดยห้ามไม่ให้โดนแสง จากนั้นเอียงใบเพื่อเอาสาร ย้อมที่ไม่ติดกับใบไอโซฟลูออโร ออก แล้วตัดใบให้มีขนาดเล็กเพื่อปิดแผ่นกระจกสไลด์ นำไปวัดด้วยเครื่อง CLSM

#### 2. กระบวนการประมวลผลภาพ

##### 2.1 กระบวนการถ่ายภาพผักกาดหอม

ภาพถ่ายผักกาดหอมที่จะนำไปวิเคราะห์ที่ถ่ายด้วยกล้อง DSLR Nikon D7200 และเลนส์ 18-140 mm ผ่านฟิลเตอร์ กรองแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 530 นาโนเมตรไม่สามารถผ่านได้การใช้ฟิลเตอร์ โดยการถ่ายภาพภายใต้ระบบถ่ายภาพที่ปิด ด้วยแผ่นรีเฟลคเตอร์สะท้อนแสง (สุวรรณและคณะ, 2559) และแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดแสง daylight (D65) และแหล่งกำเนิดแสง green ซึ่งถ่ายภาพที่ตำแหน่งเดียวกันแบ่งออกเป็น 3 ภาพ คือ 1. ถ่ายไม่ผ่านฟิลเตอร์กรองแสงภายใต้ แหล่งกำเนิดแสง D65 2. ถ่ายผ่านฟิลเตอร์กรองแสงภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 และ 3. ถ่ายผ่านฟิลเตอร์กรองแสงภายใต้ แหล่งกำเนิดแสง Green

##### 2.2 วิธีกระบวนการประมวลผลภาพ

ภาพถ่ายผักกาดหอมที่ได้จากขั้นตอนที่ 2.1 ทั้ง 3 ภาพที่ตำแหน่งเดียวกันถูกนำมาประมวลผลภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยกระบวนการประมวลผลภาพเริ่มจากการนำค่า RGB ของภาพถ่ายทั้ง 3 ภาพแปลงค่าให้อยู่ในระบบ Standard RGB (sRGB) หรือ r, g และ b ด้วยสมการที่ 1 (ASTM, 2001) เมื่อได้ค่า sRGB จากนั้นแปลงค่า sRGB ไปสู่ปริภูมิ XYZ ด้วย สมการที่ 2 (ASTM E308-01)

$$r, g, b = \begin{cases} ((R, G, B/255) + 0.055/1.05)^{2.4}, R, G, B/255 > 0.04045 \\ (R, G, B/255)/12.92, R, G, B/255 \leq 0.04045 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = 100 \times \begin{bmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อได้ค่า XYZ จากนั้นทำการคำนวณค่า reflectance spectrum ( $R(\lambda)$ ) ของภาพถ่ายที่ถ่ายผ่านฟิลเตอร์กรองแสง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง Green ด้วยฟังก์ชัน Fsolve ของ MATLAB ในการประมาณค่า  $R(\lambda)$  จากสมการที่ 3 (ASTM E308-01) โดยมีค่า  $R(\lambda)$  ของภาพถ่ายผ่านฟิลเตอร์ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 เป็นค่าเริ่มต้นของการประมาณค่า

$$X = \sum_{400}^{700} W_x R(\lambda) \Delta\lambda, \quad Y = \sum_{400}^{700} W_y R(\lambda) \Delta\lambda, \quad \text{และ} \quad Z = \sum_{400}^{700} W_z R(\lambda) \Delta\lambda \quad (3)$$

โดย  $W_x$ ,  $W_y$  และ  $W_z$  คือ ค่า weight factor ตามมาตรฐานการส่องสว่างของ CIE

**2.3 การคำนวณบริเวณการปนเปื้อน**

การคำนวณบริเวณในการปนเปื้อนด้วยการวิเคราะห์ค่า  $R(\lambda)$  แต่ละพิกเซลของภาพถ่ายที่ได้จากขั้นตอนการประมวลผลภาพขั้นตอนที่ 2.2 โดยให้พิกเซลที่มีจุดเด่นที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ซึ่งอ้างอิงจากการวัดด้วย Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) คือ บริเวณพิกเซลที่ปนเปื้อน จากนั้นคำนวณหาค่าประมาณการการเปลี่ยนแปลงของการปนเปื้อน  $[CFU.ml^{-1}.pixel^{-1}]$  บนผักกาดหอมจากสมการที่ 4

$$\text{จำนวน CFU/Pixel} = \frac{N_0}{\text{pixel}} \left[ \frac{CFU}{ml \cdot \text{pixel}} \right] \quad (4)$$

โดย  $N_0$  คือ จำนวน *E. coli* ที่หยดลงบนใบผักกาดหอม  $[CFU.ml^{-1}]$

จากนั้นเมื่อได้ค่าการปนเปื้อน *E. coli* ต่อพิกเซล จึงสามารถคำนวณหาค่าประมาณการการเปลี่ยนแปลงของการปนเปื้อน *E. coli* บนผักกาดหอมได้จากสมการที่ 5

$$\text{จำนวน CFU} = \text{จำนวน pixel} \times \text{จำนวน CFU / pixel} \left[ \frac{CFU}{ml} \right] \quad (5)$$

**ผล**

**1. ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนด้วยวิธี CLSM**

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างจากนั้นนำไปวัดด้วย CLSM พบว่าสเปกตรัมมีแถบการดูดกลืนแสงชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น คือ 610.17-628.14 nm และ 680.30-688.31 nm (Figure 1)

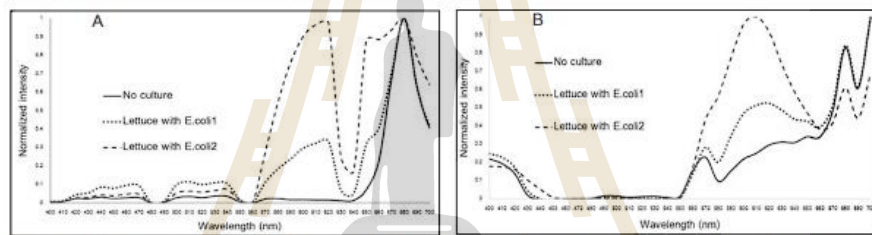


Figure 1 The emission spectrum of *E. coli* contamination and autofluorescence from (A) confocal laser scanning microscope (CLSM) and (B) image processing.

**2. ผลการตรวจสอบการปนเปื้อนด้วยวิธี image processing**

ผลของการถ่ายภาพผักกาดหอมในระบบถ่ายภาพภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 และ green แสดงใน Figure 2A และ 2B ตามลำดับ จากนั้นถ่ายภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ของแสงและภายใต้แหล่งกำเนิดแสง green (2C) พบว่าสามารถแยกบริเวณที่มีการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* และบริเวณที่ไม่มีเชื้อ *E. coli* บนใบผักกาดหอมได้อย่างชัดเจน (Figure 2D and 2E) ตามลำดับ

เมื่อได้ภาพถ่ายผักกาดหอมจากการถ่ายภาพ จากนั้นนำภาพถ่ายเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพโดยผลของการประมวลผลค่าสเปกตรัมที่ได้จากการประมวลผลภาพแสดงแถบการดูดกลืนแสงของบริเวณที่มีการปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* ที่ความยาวคลื่น  $620 \pm 10$  nm ซึ่งมีค่าเฉลี่ย normalized intensity เท่ากับ  $0.5 \pm 0.02$  และบริเวณที่ไม่มีเชื้อ *E. coli* มีค่าเฉลี่ย normalized intensity เท่ากับ  $0.29 \pm 0.07$  หรืออาจไม่แสดงแถบการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นนี้ (Figure 1B)



Figure 2 The image of Lettuce in (2A) D65, (2B) Green illuminant without filter, (2C) Green illuminant without filter with filter. The image of (2D) Contamination area and (2E) Non-Contamination area on Lettuce leaf.

### 3.ประสิทธิภาพการตรวจสอบการปนเปื้อน

จากการประมวลผลภาพถ่าย พบว่าบริเวณที่มีการหยดเชื้อลงทั้งบริเวณบนใบผักกาดหอม เมื่อทำการประมวลผลภาพออกมาให้ผลเฉลี่ยของบริเวณที่มีการปนเปื้อนร้อยละ 85.25 (Figure 3) ซึ่งเป็นบริเวณของการปนเปื้อนทั้งหมดโดยบริเวณสีแดง คือ บริเวณที่ตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนได้



Figure 3 The contamination area was detected by image processing.

#### วิจารณ์ผล

ผลของการวัดสเปกตรัมของบริเวณที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อน *E. coli* ด้วย CLSM พบว่าสเปกตรัมมีแถบการดูดกลืนแสงชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น 680.30-688.31 nm คือ การตอบสนองของคลอโรพลาสต์หรือ chloroplast autofluorescence ที่ความยาวคลื่น 680 nm (Kodama, 2016) และในช่วงความยาวคลื่น 610.17-628.14 nm โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการปนเปื้อนเท่านั้น นั่นคือ การตอบสนองของไบโอฟิล์ม *E. coli* เมื่อประมวลผลภาพถ่ายของบริเวณที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อน *E. coli* พบว่าสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวให้ผลที่สอดคล้องกับผลของ CLSM โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.95 ดังนั้นการแยกบริเวณที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อน *E. coli* จึงสามารถแยกได้โดยการตั้งค่า normalized intensity ที่  $620 \pm 10$  nm เท่ากับ  $0.5 \pm 0.02$  คือ บริเวณที่มีการปนเปื้อน *E. coli*

ผลของการคำนวณบริเวณการปนเปื้อน *E. coli* บนผักกาดหอมโดยการนับพิกเซลของภาพถ่ายและใช้สมการที่ 5 ในการคำนวณบริเวณของการปนเปื้อนในรูปของ CFU.ml<sup>-1</sup> เมื่อทำการเตรียมเชื้อ *E. coli* ปริมาณ  $2.7 \times 10^5$  [CFU.ml<sup>-1</sup>] แล้วหยดลงบนใบผักกาดหอม จากนั้นทำการประมวลผลภาพถ่าย และนำจำนวนของพิกเซลที่มีการปนเปื้อนมาคำนวณหาจำนวนเชื้อด้วยสมการที่ 4 พบว่าบริเวณที่ทำการหยดเชื้อลงบนใบผักกาดหอมมีจำนวนเชื้อ  $1.1 \times 10^3$  [CFU.ml<sup>-1</sup>.pixel<sup>-1</sup>] และติดตามผลของการเพิ่มขึ้นของเชื้อหลังจากการปนเปื้อนตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน เมื่อนำมาคำนวณบริเวณการปนเปื้อนจากการประมวลผลภาพถ่ายจากสมการที่ 5 พบว่ามีจำนวนเชื้อเพิ่มขึ้นถึง  $1.3 \times 10^5$  CFU.ml<sup>-1</sup>

#### สรุปผล

วิธีการประมวลผลภาพสามารถแยกบริเวณที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* บนผักกาดหอม โดยการใส่สเปกตรัมความยาวคลื่น  $620 \pm 10$  nm และสามารถคำนวณบริเวณของการปนเปื้อนเมื่อเวลาผ่านไปได้

#### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- สุวรรณ เอกภรณ์, จินตพร กลิ่นสุข และ วีระศักดิ์ เลิศวิไลอิน. 2559. การวัดสีผักกาดหอมพันธุ์กินใจด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 47(3 พิเศษ): 417-420.
- ASTM. 2001. Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System. ASTM E308-01. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Kodama, Y. 2016. Time Gating of Chloroplast Autofluorescence Allows Clearer Fluorescence Imaging in Planta. PLOS ONE 11(3).



ภาคผนวก จ

หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์



ทะเบียนข้อมูลเลขที่ ว1.010511

คำขอแจ้งข้อมูลเลขที่ 428396

## หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์

ออกให้เพื่อแสดงว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้แจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา

เมื่อวันที่ 7 เดือน เมษายน พ.ศ. 2566

ประเภทงาน วรรณกรรม ลักษณะงาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อผลงาน อัลกอริทึมเพื่อการควบคุมเครื่องสเปกโตรกราฟแบบเลี้ยวเบนแสงที่ใช้เครื่องตรวจจับ

วัดสัญญาณแสงแบบโฟลคคอลเพลนอาร์เรย์ชนิด ไมโครโบลอมีเตอร์

สำหรับแยกความยาวคลื่นแสงมอดอินฟราเรด

ออกให้ ณ วันที่ 3 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ลงชื่อ.....

(นางธนัญญา ไซตติลล)

นักวิชาการพาณิชย์ชำนาญการพิเศษ

ปฏิบัติราชการแทนผู้อำนวยการกองลิขสิทธิ์

หมายเหตุ เอกสารนี้มิได้รับรองความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

ในกรณีมีข้อพิพาทศาลจะเป็นผู้วินิจฉัยชี้ขาดความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

## ประวัติผู้เขียน

นายภัทรพงษ์ สู้หนองบัว เกิดวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2539 จบการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลชัยภูมิ ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2560

